

УДК 621.43.011

М.М. Шпилька, к.т.н., доцент

О.В. Криворучко, магістрант

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ВЕРТИКАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ АВТОЕВАКУАТОРА З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ДОДАТКОВО ПІДПРУЖИНЕНОГО ВАНТАЖУ

Розроблено математичну модель руху автоевакуатора з метою дослідження та аналізу динамічних процесів, що відбуваються під час руху, при цьому враховано коливання автомобіля, що пружно закріплений на платформі автоевакуатора.

Ключові слова: автоевакуатор, динамічні процеси, коливання, платформа.

УДК 621.43.011

Н.Н. Шпилька, к.т.н., доцент

А.В. Криворучко, магістрант

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ АВТОЭВАКУАТОРА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНО ПОДПРУЖИНЕННОГО ГРУЗА

Разработана математическая модель движения автоэвакуатора с целью исследования и анализа динамических процессов, происходящих во время движения, при этом учтены колебания автомобиля, упруго закрепленного на платформе автоэвакуатора.

Ключевые слова: автоэвакуатор, динамические процессы, колебания, платформа.

UDC 621.43.011

N.N. Shpilka, PhD, Associate Professor

A.V. Krivoruchko, master student

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

RESEARCH OF VERTICAL VIBRATIONS DYNAMICS OF THE TOW TRUCK WITH ACCOUNTING THE ADDITIONALLY SUBSPRINGY CARGO INFLUENCE

In the given article a mathematical model of an tow truck movement is developed for the purpose of the investigation and analysis the dynamic processes taking place during the movement, as well as the oscillation of the car that is elastically established on a platform of the tow truck.

Keywords: tow truck, dynamic processes, oscillations, platform.

Вступ. Рухомі механічні системи з пружно закріпленими вантажами досить поширені, зокрема і в транспорті. Прикладами можуть бути автовози-евакуатори, дволанкові автовози, двосекційні автобуси і тролейбуси, десантні літаки, залізничні платформи з машинами (комбайнами, тракторами, автомобілями) тощо.

Одним із типових випадків механічних систем із пружно закріпленими вантажами є автоевакуатор. Такий колісний транспортний засіб перевозить легкові автомобілі, що коливаються під час транспортування, тому для об'єктивного дослідження й аналізу руху динамічних процесів, що відбуваються під час руху цієї машини, необхідно створити таку математичну модель, яка відтворювала б особливості компонування та взаємодію окремих елементів або ланок реальної коливальної системи. Іншими словами, необхідно врахувати коливання автомобіля, що пружно закріплений на платформі автоевакуатора (рисунок 1). Закріплення вантажу визначає поведінку такої колісної машини з погляду стійкості та плавності руху на дорозі. Типове закріплення автомобіля полягає у жорсткому кріпленні коліс до рами спеціальними стягувальними ремнями навколо кожного колеса, що під час транспортування, внаслідок коливань автомобіля-вантажувача, створює додаткові навантаження – збурення для стійкості та плавності руху самого евакуатора. Тому очевидна доцільність дослідження динаміки вертикальних коливань такого колісного транспортного засобу з урахуванням додатково підпружиненого вантажу.

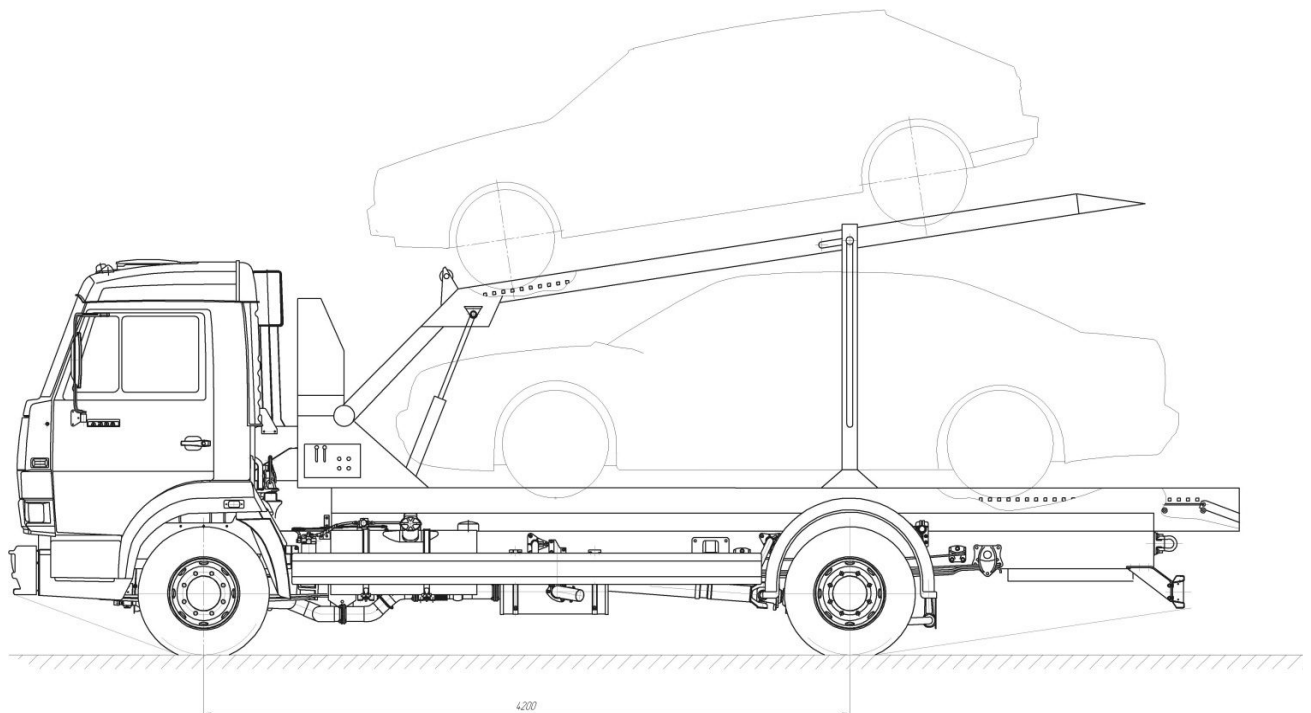


Рис. 1. Здвоєний евакуатор

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Питанням дослідження вертикальної динаміки колісних транспортних засобів присвячено чимало наукових праць [1–10]. Вивчають переважно автомобілі та автопоїзди загального призначення. Практично немає досліджень процесів руху колісних машин з урахуванням пружного закріплення вантажів, крім напівпричепа-автовоза [11], де автомобілі розглядають як окремі дискретні точкові маси, що пружно закріплені на платформах.

Автоевакуатор є складною багатомасовою механічною системою з багатьма степенями вільності. При цьому задача з визначення деяких параметрів коливань системи є дуже трудомісткою. Для підвищення якості проектування та конструкторської доводки цих машин необхідна висока точність і багатофакторність розрахунків при побудові математичної моделі, яка повинна визначати основні групи динамічних параметрів.

Тому головною проблемою є оптимізація коливних процесів і їх гасіння з урахуванням вимог стандартів ІСО 2631-74 і ГОСТ 12.1.012-78, що визначають обмеження на вібрації та коливання, а також інші важливі показники, пов'язані з плавністю руху, стійкістю й керованістю.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Не повною мірою розглянуто вплив підпружиненого вантажу на динаміку вертикальних коливань автоевакуатора з двома платформами.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження вертикальної динаміки дворівневого автоевакуатора (рис. 1) на основі математичного описування його спрощеної схеми (рис. 2) з метою мінімізації амплітуди коливань вантажу шляхом раціонального розміщення його на платформі.

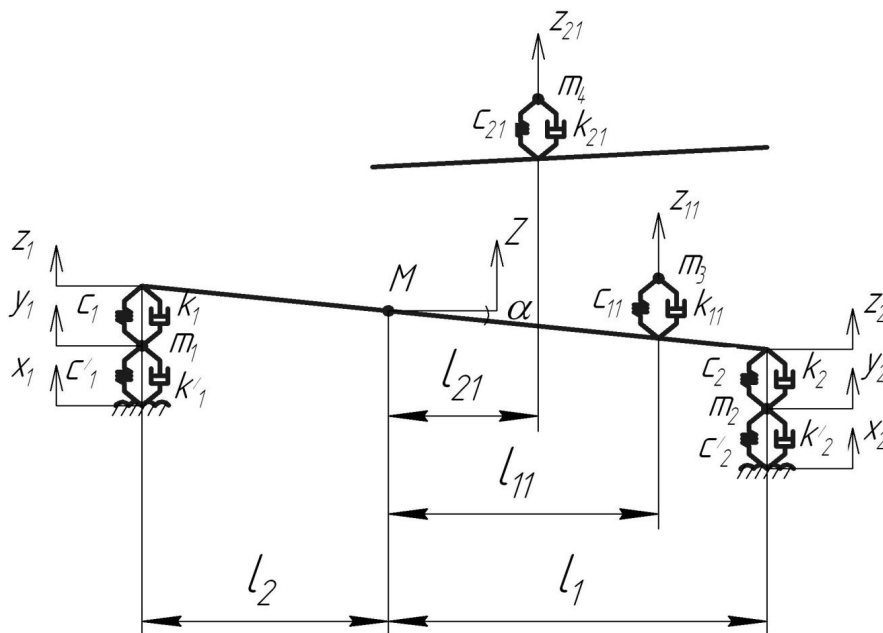


Рис. 2. Розрахункова схема евакуатора

Основний матеріал і результати. Математичну модель динаміки будемо описувати диференціальними рівняннями на основі рівнянь Лагранжа 2-го роду, які базуються на основі кінематичного і динамічного аналізу конструкції евакуатора:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = \frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i}, \quad (1)$$

де $L = T - U$ – функція Лагранжа; T , U , R – відповідно кінетична, потенціальна енергія та дисипативна функція; q_j – узагальнена координата.

Тоді рівняння Лагранжа 2-го роду можна подати у вигляді

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial U}{\partial \dot{q}_i} = \frac{\partial T}{\partial q_i} - \frac{\partial U}{\partial q_i} - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i}. \quad (2)$$

Зміщення враховуємо відносно положення статичної рівноваги, тоді вид рівнянь не зміниться при дії сили ваги і її можна явно не вказувати. Запишемо функцію (1) для руху евакуатора, вибираючи за координати вертикальні переміщення підресорених z та не підресорених мас y з відповідними індексами згідно з рисунком 2. Як збурювальну функцію x для прикладу вибрано профіль одиничної нерівності у вигляді половини синусоїди [5].

Порівнюючи коливання, спричинені одиничними нерівностями з коливаннями, що викликані профілем дороги, який змінюється за синусоїдальним законом, відмінності є кількісними та незначними. Позначимо також: m_1 , m_2 – невідресорені маси відповідних мостів автоевакуатора; m_3 , m_4 – маси підресорених частин вантажу; M , I – підресорена маса евакуатора і його момент інерції відносно центральної осі, що проходить перпендикулярно до площини рисунка; c_1 , c_2 , c'_1 , c'_2 , c_{11} , c_{21} , k_1 , k_2 , k'_1 , k'_2 , k_{11} , k_{21} – відповідні еквівалентні жорсткості підвісок та шин і їх коефіцієнти в'язкого тертя; l_1 , l_2 , l_{11} , l_{12} – відповідні геометричні параметри евакуатора.

Кінетична енергія системи становить

$$T = \frac{1}{2} M \cdot \dot{z}^2 + \frac{1}{2} I \cdot \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} m_1 \cdot \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot \dot{y}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \cdot \dot{z}_{11}^2 + \frac{1}{2} m_4 \cdot \dot{z}_{21}^2, \quad (3)$$

$$\text{де значення змінних } z = \frac{z_1 \cdot l_2 + z_2 \cdot l_1}{l_1 + l_2}, \quad \alpha = \frac{z_1 - z_2}{l_1 + l_2}.$$

Потенціальна енергія системи становить

$$\begin{aligned}
U &= \frac{1}{2}c_1(z_1 - y_1)^2 + \frac{1}{2}c'_1(y_1 - x_1)^2 + \frac{1}{2}c_2(z_2 - y_2)^2 + \frac{1}{2}c'_2(y_2 - x_2)^2 + \\
&+ \frac{1}{2}c_{11}\left(z_{11} + \frac{z_1 - z_2}{l_1 + l_2} \cdot l_{11}\right)^2 + \frac{1}{2}c_{21}\left(z_{21} + \frac{z_1 - z_2}{l_1 + l_2} \cdot l_{21}\right)^2 = \\
&= \frac{1}{2}c_1(z_1^2 - 2z_1y_1 + y_1^2) + \frac{1}{2}c'_1(y_1^2 - 2y_1x_1 + x_1^2) + \frac{1}{2}c_2(z_2^2 - 2z_2y_2 + y_2^2) + \\
&+ \frac{1}{2}c'_2(y_2^2 - 2y_2x_2 + x_2^2) + \frac{1}{2}c_{11}(z_{11}^2 + 2z_{11}\alpha \cdot l_{11} + \alpha^2 l_{11}^2) + \\
&+ \frac{1}{2}c_{21}(z_{21}^2 + 2z_{21}\alpha \cdot l_{21} + \alpha^2 l_{21}^2).
\end{aligned} \tag{4}$$

Дисипативна функція Релея буде мати вигляд

$$\begin{aligned}
R &= \frac{1}{2}k_1(\dot{z}_1 - \dot{y}_1)^2 + \frac{1}{2}k'_1(\dot{y}_1 - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2}k_2(\dot{z}_2 - \dot{y}_2)^2 + \frac{1}{2}k'_2(\dot{y}_2 - \dot{x}_2)^2 + \\
&+ \frac{1}{2}k_{11}\left(\dot{z}_{11} + \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{l_1 + l_2} \cdot l_{11}\right)^2 + \frac{1}{2}k_{21}\left(\dot{z}_{21} + \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{l_1 + l_2} \cdot l_{21}\right)^2 = \\
&= \frac{1}{2}k_1(\dot{z}_1^2 - 2\dot{z}_1\dot{y}_1 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2}k'_1(\dot{y}_1^2 - 2\dot{y}_1\dot{x}_1 + \dot{x}_1^2) + \frac{1}{2}k_2(\dot{z}_2^2 - 2\dot{z}_2\dot{y}_2 + \dot{y}_2^2) + \\
&+ \frac{1}{2}k'_2(\dot{y}_2^2 - 2\dot{y}_2\dot{x}_2 + \dot{x}_2^2) + \frac{1}{2}k_{11}(\dot{z}_{11}^2 + 2\dot{z}_{11}\dot{\alpha} \cdot l_{11} + \dot{\alpha}^2 l_{11}^2) + \\
&+ \frac{1}{2}k_{21}(\dot{z}_{21}^2 + 2\dot{z}_{21}\dot{\alpha} \cdot l_{21} + \dot{\alpha}^2 l_{21}^2)
\end{aligned} \tag{5}$$

Знайдемо похідні, необхідні для складання рівняння Лагранжа другого роду:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial \dot{z}_1} &= \frac{M}{2(l_1 + l_2)^2} \cdot (2\dot{z}_1 \cdot l_2^2 + 2\dot{z}_2 \cdot l_2 \cdot l_1) + \frac{I(2\dot{z}_1 - 2\dot{z}_2)}{2(l_1 + l_2)^2} = \\
&= \frac{M \cdot l_2^2 + I}{(l_1 + l_2)^2} \cdot \dot{z}_1 + \frac{M \cdot l_2 \cdot l_1 - I}{(l_1 + l_2)^2} \cdot \dot{z}_2,
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{z}_1} = a_{11}\ddot{z}_1 + a_{12}\ddot{z}_2, \tag{7}$$

$$\text{де } a_{11} = \frac{M \cdot l_2^2 + I}{(l_1 + l_2)^2}, \quad a_{12} = \frac{M \cdot l_2 \cdot l_1 - I}{(l_1 + l_2)^2},$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{z}_2} = \frac{M}{2(l_1 + l_2)^2} \cdot (2\dot{z}_1 \cdot l_2 \cdot l_1 + 2\dot{z}_2 \cdot l_1^2) + \frac{I(-2\dot{z}_1 + 2\dot{z}_2)}{2(l_1 + l_2)^2} =$$

$$= \frac{M \cdot l_2 \cdot l_1 - I}{(l_1 + l_2)^2} \cdot \dot{z}_1 + \frac{M \cdot l_1^2 + I}{(l_1 + l_2)^2} \cdot \dot{z}_2, \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{z}_2} = a_{21} \ddot{z}_1 + a_{22} \ddot{z}_2, \quad (9)$$

$$\text{де } a_{21} = \frac{M \cdot l_2 \cdot l_1 - I}{(l_1 + l_2)^2}, \quad a_{22} = \frac{M \cdot l_1^2 + I}{(l_1 + l_2)^2},$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot 2\dot{y}_1 = m_1 \dot{y}_1, \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} = m_1 \ddot{y}_1. \quad (11)$$

Аналогічно визначаємо похідні:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_2} = m_2 \ddot{y}_2, \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{z}_{11}} = m_3 \ddot{z}_{11}, \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{z}_{21}} = m_4 \ddot{z}_{21}. \quad (14)$$

Знаходимо часткові похідні від потенціальної енергії (4) за узагальненою швидкістю $\partial \dot{q}_i$:

$$\frac{\partial U}{\partial \dot{z}_1} = \frac{\partial U}{\partial \dot{z}_2} = \frac{\partial U}{\partial \dot{y}_1} = \frac{\partial U}{\partial \dot{y}_2} = \frac{\partial U}{\partial \dot{z}_{11}} = \frac{\partial U}{\partial \dot{z}_{21}} = 0, \quad (15)$$

тоді

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial U}{\partial \dot{z}_1} = \frac{d}{dt} \frac{\partial U}{\partial \dot{z}_2} = \frac{d}{dt} \frac{\partial U}{\partial \dot{y}_1} = \frac{d}{dt} \frac{\partial U}{\partial \dot{y}_2} = \frac{d}{dt} \frac{\partial U}{\partial \dot{z}_{11}} = \frac{d}{dt} \frac{\partial U}{\partial \dot{z}_{21}} = 0. \quad (16)$$

Для складання правої частини рівняння Лагранжа другого роду виконуємо диференціювання.

Часткові похідні від кінетичної енергії T за узагальненою координатою q_i дорівнюють

$$\frac{\partial T}{\partial z_1} = \frac{\partial T}{\partial z_2} = \frac{\partial T}{\partial y_1} = \frac{\partial T}{\partial y_2} = \frac{\partial T}{\partial z_{11}} = \frac{\partial T}{\partial z_{21}} = 0. \quad (17)$$

Визначимо часткові похідні від потенціальної енергії за узагальненою координатою q_i :

$$\frac{\partial U}{\partial z_1} = \frac{1}{2} c_1 (2z_1 - 2y_1) = c_1 (z_1 - y_1), \quad (18)$$

$$\frac{\partial U}{\partial z_2} = \frac{1}{2} c_2 (2z_2 - 2y_2) = c_2 (z_2 - y_2), \quad (19)$$

$$\frac{\partial U}{\partial y_1} = \frac{1}{2} c'_1 (2y_1 - 2x_1) = c'_1 (y_1 - x_1), \quad (20)$$

$$\frac{\partial U}{\partial y_2} = \frac{1}{2} c'_2 (2y_2 - 2x_2) = c'_2 (y_2 - x_2), \quad (21)$$

$$\frac{\partial U}{\partial z_{11}} = \frac{1}{2} c_{11} (2z_{11} + 2\alpha \cdot l_{11}) = c_{11} (z_{11} + \alpha \cdot l_{11}), \quad (22)$$

$$\frac{\partial U}{\partial z_{21}} = \frac{1}{2} c_{21} (2z_{21} + 2\alpha \cdot l_{21}) = c_{21} (z_{21} + \alpha \cdot l_{21}). \quad (23)$$

Далі знаходимо часткові похідні від дисипативної функції Релея за узагальненою швидкістю $\partial \dot{q}_i$:

$$\frac{\partial R}{\partial \dot{z}_1} = \frac{1}{2} k_1 (2\dot{z}_1 - 2\dot{y}_1) = k_1 (\dot{z}_1 - \dot{y}_1), \quad (24)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \dot{z}_2} = \frac{1}{2} k_1 (2\dot{z}_2 - 2\dot{y}_2) = k_1 (\dot{z}_2 - \dot{y}_2), \quad (25)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \dot{y}_1} = \frac{1}{2} k'_1 (2\dot{y}_1 - 2\dot{x}_1) = k'_1 (\dot{y}_1 - \dot{x}_1), \quad (26)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \dot{y}_2} = \frac{1}{2} k'_2 (2\dot{y}_2 - 2\dot{x}_2) = k'_2 (\dot{y}_2 - \dot{x}_2), \quad (27)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \dot{z}_{11}} = \frac{1}{2} k_{11} (2\dot{z}_{11} + 2\dot{\alpha} \cdot l_{11}) = k_{11} (\dot{z}_{11} + \dot{\alpha} \cdot l_{11}), \quad (28)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \dot{z}_{21}} = \frac{1}{2} k_{21} (2\dot{z}_{21} + 2\dot{\alpha} \cdot l_{21}) = k_{21} (\dot{z}_{21} + \dot{\alpha} \cdot l_{21}). \quad (29)$$

Підставивши вирази (3 – 29) у рівняння Лагранжа (2), отримуємо систему із шести диференціальних рівнянь другого порядку (30), що описують вертикальні коливання евакуатора з урахуванням пружних властивостей вантажу,

$$\begin{cases} a_{11}\ddot{z}_1 + a_{12}\ddot{z}_2 + k_1(\dot{z}_1 - \dot{y}_1) + c_1(z_1 - y_1) = 0 \\ a_{21}\ddot{z}_1 + a_{22}\ddot{z}_2 + k_2(\dot{z}_2 - \dot{y}_2) + c_2(z_2 - y_2) = 0 \\ m_1\ddot{y}_1 + k_1'(\dot{z}_1 - \dot{x}_1) + c_1'(z_1 - x_1) = 0 \\ m_2\ddot{y}_2 + k_2'(\dot{z}_2 - \dot{x}_2) + c_2'(z_2 - x_2) = 0 \\ m_3\ddot{z}_{11} + k_{11}(\dot{z}_{11} + \dot{\alpha} \cdot l_{11}) + c_{11}(z_{11} + \alpha \cdot l_{11}) = 0 \\ m_4\ddot{z}_{21} + k_{21}(\dot{z}_{21} + \dot{\alpha} \cdot l_{21}) + c_{21}(z_{21} + \alpha \cdot l_{21}) = 0 \end{cases} \quad (30)$$

Виходячи з отриманих рівнянь можна визначити раціональні координати місця встановлення вантажу на евакуаторі з умови забезпечення мінімальних його коливань на платформі.

Для цього приймаємо

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{C_{11} \cdot \alpha \cdot l_{11}}{m_3}} \quad ; \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{C \cdot \alpha \cdot l_{21}}{m_4}} \quad , \quad (31)$$

де ω_1, ω_2 – частота коливання вантажів.

Щоб зменшити вплив коливань один на одного й уникнути резонансу необхідне максимальне розходження частот

$$\max \left[\sqrt{\frac{C_{11} \cdot \alpha \cdot l_{11}}{m_3}} - \sqrt{\frac{C_{21} \cdot \alpha \cdot l_{21}}{m_4}} \right] \quad (32)$$

За умови, що

$$\frac{m_3 \cdot l_{11} + m_4 \cdot l_{21}}{l_{11} + l_{21}} = a$$

Робимо підбір l_{11}, l_{21} методом знаходження умовного екстремуму Лагранжа

$$\phi(l_{11}, l_{21}) = \left(\sqrt{\frac{C_{11} \cdot \alpha \cdot l_{11}}{m_3}} - \sqrt{\frac{C_{21} \cdot \alpha \cdot l_{21}}{m_4}} \right) + \lambda \cdot \left(\frac{m_3 \cdot l_{11} + m_4 \cdot l_{21}}{l_{11} + l_{21}} \right) \quad , \quad (33)$$

де λ – множник Лагранжа.

Для знаходження l_{11}, l_{21} пишемо рівняння Лагранжа за умови, що

$$\phi'_{l_{11}} = 0;$$

$$\phi'_{l_{21}} = 0;$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \sqrt{C_{11} \cdot \alpha} \cdot \sqrt{\frac{1}{m_3 \cdot l_{11}}} + \lambda \cdot \left(\frac{m_3 \cdot l_{11}}{l_{11} + l_{21}} \right)'_{l_{11}} = 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_{21} \cdot \alpha}{m_4 \cdot l_{21}}} + \lambda \cdot \left(\frac{m_3 \cdot l_{21}}{l_{11} + l_{21}} \right)'_{l_{21}} = 0 \\ \frac{m_3 \cdot l_{11} + m_4 \cdot l_{21}}{l_{11} + l_{21}} = a \end{cases} \quad (34)$$

Знаходимо похідну

$$\lambda \cdot \left(\frac{m_3 \cdot l_{11}}{l_{11} + l_{21}} \right)'_{l_{11}} = \lambda \cdot m_3 \cdot \left(\frac{(l_{11} + l_{21}) - l_{11}}{(l_{11} + l_{21})^2} \right) = \frac{\lambda \cdot m_3 \cdot l_{21}}{l_{11} + l_{21}} \quad (35)$$

За умови, що $\left[a = \frac{l}{2} \right]$,

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_{11} \cdot \alpha}{m_3 \cdot l_{11}}} + \frac{\lambda \cdot m_3 \cdot l_{21}}{(l_{11} + l_{21})^2} = 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_{21} \cdot \alpha}{m_4 \cdot l_{21}}} + \frac{\lambda \cdot m_4 \cdot l_{11}}{(l_{11} + l_{21})^2} = 0 \\ \frac{m_3 \cdot l_{11} + m_4 \cdot l_{21}}{l_{11} + l_{21}} = a \end{cases} \quad (36)$$

Результат рішення системи – раціональні значення l_{11} та l_{12} .

При розрахунку вільних коливань евакуатора можна змоделювати випадок – переїзд через одиничну нерівність, дія якої на колеса носить ударний характер (імпульс зовнішньої сили). Вибір початкового збурення у вигляді одиничного імпульсу обумовлено тим, що напряду можна поміряти імпульсну характеристику евакуатора, яка визначається як добуток реакції системи на δ -функцію Дірака.

При дослідженні коливальних процесів, які виникають при переїзді одиничної нерівності, приймаємо, що початкові умови в момент наїзду на нерівність відомі.

Рівняння руху евакуатора компактно записано в матричній формі відносно вектора узагальнених змінних z

$$f = M \cdot \ddot{z} + k \cdot \dot{z} + c \cdot z, \quad (37)$$

де M , k , c – матриці узагальнених мас, коефіцієнтів демпфування та пружності відповідно; f – вектор-стовпчик узагальнених сил.

Для оцінювання коливальної системи можна використати комплексну частотну характеристику

$$F(i\omega) = \left(\left[(i\omega)^2 \cdot M + (i\omega) \cdot k + c \right]^{-1} \right). \quad (38)$$

Таким чином, розрахувавши часову спектральну функцію мікропрофілю дороги $S_f(\omega)$ та комплексну частотну характеристику евакуатора, можна отримати спектральну функцію пришвидшень підресорених мас

$$S_z(\omega) = \omega^4 \cdot |F(i\omega)|^2 S_f(\omega), \quad (39)$$

а також розрахувати дисперсію середньоквадратичних пришвидшень D_z та середньоквадратичні пришвидшення підресорених мас σ_z

$$D_z = \int_0^{\infty} S_z(\omega) d\omega, \quad \sigma_z = \sqrt{D_z}. \quad (40)$$

Цим самим можна врахувати вплив випадкового збурення на динамічну систему автовозу, отримати матрицю комплексних частотних характеристик, з яких (з урахуванням спектральної функції нерівностей дороги) отримуються значення середньоквадратичних пришвидшень.

Модель розраховувалася для навантаженого евакуатора (два автомобілі з масами по 1200 кг), що рухається із середньою експлуатаційною швидкістю 40 км/год під час наїзду на поодинокую перешкоду з висотою 0,05 м з урахуванням пружних властивостей вантажу.

Вихідні дані для розрахунку: $m_1=1100$ кг, $m_2=1450$ кг – непідресорені маси відповідних мостів автоевакуатора; $M=4000$ кг – підресорена маса евакуатора; $c_1=c_2=113$ кН/м, $c'_1=c'_2=510$ кН/м, $c_{11}=c_{21}=48$ кН/м, $k_1=k_2=15$ кНс/м, $k'_1=k'_2=12$ кНс/м, $k_{11}=k_{21}=5.7$ кНс/м – відповідні еквівалентні жорсткості підвісок та шин і їх коефіцієнти в'язкого тертя; $l_1=2600$ мм, $l_2=1600$ мм, $l_{11}=1200$ мм, $l_{21}=600$ мм – відповідні геометричні параметри евакуатора.

Момент інерції евакуатора відносно центральної осі, що проходить перпендикулярно до площини рисунка, знаходимо за формулою, кг·м²,

$$J = \frac{m_u \cdot r_k^2}{(u_{\ddot{a}} \cdot u_{\ddot{e}i})^2}, \quad (41)$$

$$J = \frac{11900 \cdot 0.3732^2}{(4.22 \cdot 7.31)^2} = 1,742, \quad (42)$$

де r_k – динамічний радіус кочення коліс, м;

$$r_k = 0.0127d + B(1 - \lambda_\theta); \quad (43)$$

$$r_k = 0.0127 \cdot 19.5 + 0.135(1 - 0.07) = 0,3732; \quad (44)$$

d – внутрішній діаметр, дюйм, $d=19,5$;

B – ширина профілю, м, $B=0,135$;

λ_θ – коефіцієнт шини, $\lambda_\theta=0,07$;

m_u – максимально допустима маса евакуатора, кг, $m_u=4900$;

$u_{\ddot{a}_i}, u_{\dot{e}_i}$ – передаточне число, відповідно головної передачі та коробки передач (першої передачі).

У результаті розрахунку отримано графіки коливання евакуатора й автомобілів-вантажів на ньому (рис. 3 – 6).

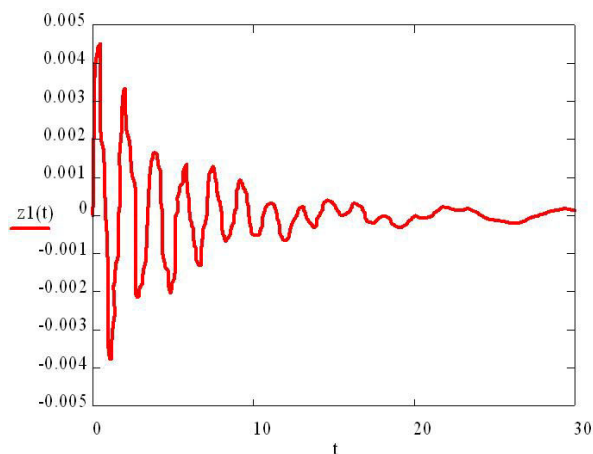


Рис. 3. Переміщення переднього мосту евакуатора

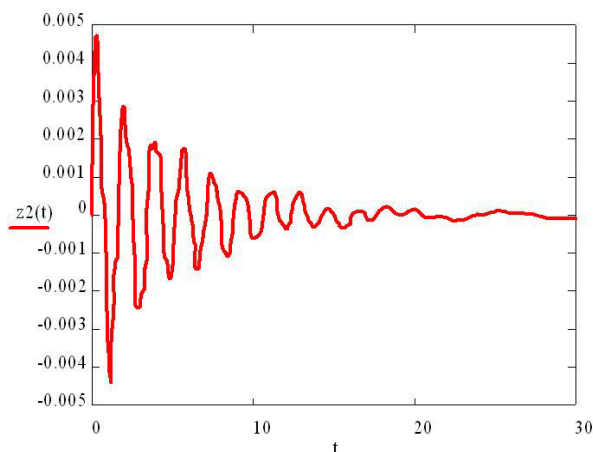


Рис. 4. Переміщення заднього мосту евакуатора

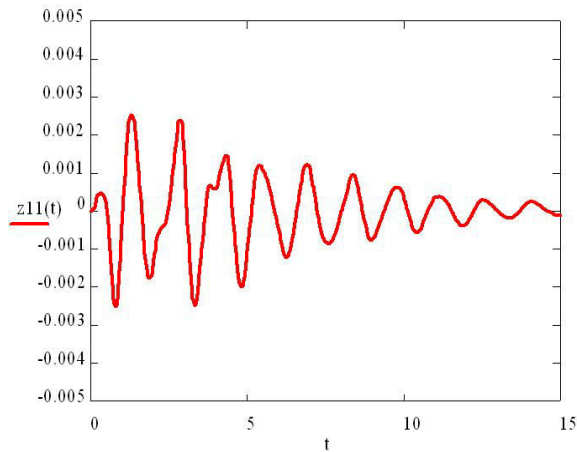


Рис. 5. Переміщення автомобіля на нижній платформі

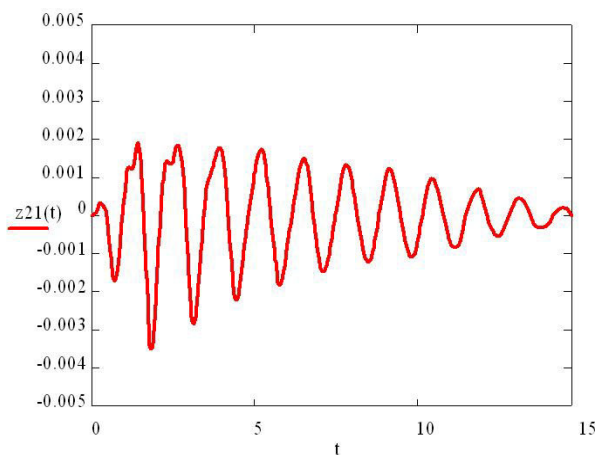


Рис. 6 . Переміщення автомобіля на верхній платформі

Коливання заднього та переднього мостів евакуатора являють собою синусоїди, які експоненціально затухають. Максимальне переміщення становить 0,0045 м на перших секундах руху при наїзді на перешкоду.

Переміщення вантажів як на верхній, так і на нижній вантажній платформі (рис. 5, 6) є також синусоїдами, що експоненціально затухають. Максимальна амплітуда коливань становить 0,0035 м для автомобіля, розміщеного на верхній вантажній платформі. Найменше зміщення від положення рівноваги отримує автомобіль, розміщений на верхній вантажній платформі. Воно становить 0,0025 м. Це свідчить про зменшення ризиків пошкодження вантажів під час транспортування, а також дає можливість зменшувати зазор до допустимого рівня між дахом автомобіля і верхньою платформою для зниження центра ваги цієї системи.

Висновки. Результати моделювання вказують на те, що для системи евакуатор – вантаж урахування пружних властивостей вантажу приводить до істотного зменшення частоти та амплітуди вертикальних коливань системи. Отже, наявність вантажу можна розглядати як засіб динамічного пасивного гасіння коливань (у разі правильного вибору конструктивних і компоновальних параметрів). При цьому існуватиме певна резонансна швидкість руху системи, на якій цей ефект буде проявлятися максимально.

Визначення величин максимальних амплітуд коливання вантажів дає змогу зменшувати відстань між вантажем і верхньою платформою, при цьому не збільшуючи ризик пошкодження його під час транспортування. У свою чергу зниження висоти платформи зменшує висоту центра ваги системи, що поліпшує стійкість автоевакуатора.

Література

1. Хачатуров А.А. Динамика системы «дорога – шина – автомобиль – водитель»/ А.А. Хачатуров, М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
2. Хачатуров А.А. Расчет эксплуатационных параметров движения автомобиля и автопоезда / А.А. Хачатуров, В.П. Афанасьев, В.С. Васильев. – М. : Транспорт, 1982. – 264 с.
3. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля/ Р.В. Ротенберг – М. : Машиностроение, 1972. – 392 с.
4. Яценко Н.Н. Плавность хода грузовых автомобилей / Н.Н. Яценко, О.К. Прутчиков. – М. : Машиностроение, 1969. – 219 с.
5. Яценко Н.Н. Колебания, прочность и форсированные испытания грузовых автомобилей / Н.Н. Яценко – М. : Машиностроение, 1972. – 368 с.
6. Динамика машин: учебное пособие / Г.И. Гладков, А.М. Петренко. – М. : Изд-во МАДИ, 2001. – 139 с.
7. Кузьо І.В. Вплив пружних властивостей вантажу на динаміку дволанкового автовозу / І.В. Кузьо, О.В. Житенко // Вісник НУ "Львівська політехніка": Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – Львів : НУ «Львівська політехніка». – 2008. – № 614. – С. 94–100.
8. Кондрашкин И.С. Принципы построения математических моделей динамики движения автомобиля / И.С. Кондрашкин, С.П. Контанистов, В.М. Семенов // Автомобильная промышленность. – 1979. – № 7. – С. 25 – 27.

Надійшла до редакції 11.10.2013
© М.М. Шпилька, О.В. Криворучко