

УДК 622.625.6

В.О. Гугаревич, канд. техн. наук, доц.

Донецкий национальный технический университет, Украина

Тел.: +38 (062) 3010787; E-mail: gvodonntu@gmail.com

ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ШАХТНОЙ ПОДВЕСНОЙ МОНОРЕЛЬСОВОЙ ДОРОГИ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ

В статье установлена взаимосвязь между параметрами монорельсового пути и подвижного состава при торможении шахтной подвесной монорельсовой дороги. Разработана математическая модель колебаний указанных частей дороги как системы упругих тел, связанных между собой. Проведены теоретические исследования продольных колебаний, возникающих во время торможения подвижного состава. Найденны частоты главных колебаний рассматриваемой системы. Полученные результаты позволяют обоснованно устанавливать параметры крепления монорельса шахтных подвесных монорельсовых дорог.

Ключевые слова: монорельс, дорога, колебания, математическая модель, частота.

1. Введение

Шахтные подвесные монорельсовые дороги получают широкое распространение в качестве вспомогательного транспорта [1, 2]. Для этих дорог существующие теории динамики напочвенного рельсового транспорта [3-6] имеют ограниченное применение из-за конструктивных отличий путей и ходовых частей этих видов транспорта. Вместе с тем, эффективное и безопасное функционирование подвесных монорельсовых дорог во многом определяется динамическими процессами, возникающими во время торможения подвижного состава. Поэтому данная проблема является актуальной.

2. Цель и постановка задач работы

Цель работы заключается в установлении взаимосвязи между параметрами колебаний монорельсового пути и подвижного состава при торможении и для определения дополнительных динамических нагрузок на подвеску монорельсовой дороги.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- составить расчетную схему продольных колебаний монорельсового пути и подвесной части подвижного состава
- разработать математическую модель продольных колебаний подвесной монорельсовой дороги при торможении;
- провести теоретические исследования возникающих продольных колебаний монорельса и подвесной части подвижного состава.

3. Основное содержание и результаты работы

Рассмотрим движение подвесной монорельсовой дороги, когда монорельсовый путь свободно подвешен к верхнякам арочной крепи горной выработки (рис. 1) и на своих подвесках длиной l_c может смещаться в продольной плоскости на угол ϑ , а подвесная часть подвижного состава с длиной подвески h_c - на угол φ .

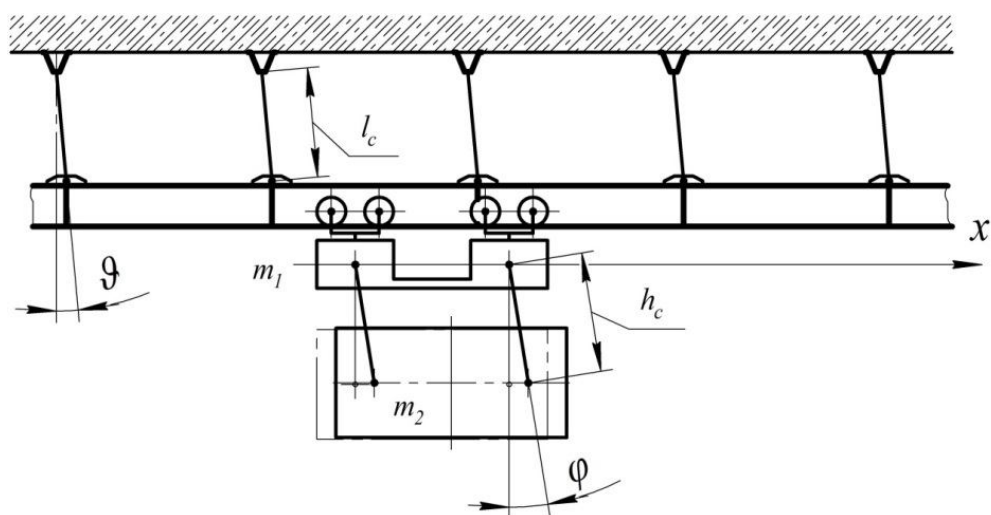


Рис. 1. Схема продольных колебаний монорельсового пути и подвесной части подвижного состава

Поскольку при торможении шахтной подвесной монорельсовой дороги приведенные массы тележек части имеют одинаковые мгновенные значения перемещений [7], их собственная масса значительно меньше массы монорельса, то расчетная схема может быть представлена в виде системы с двумя степенями свободы, где m_1 – приведенная масса монорельса с приведенной к нему массой тележек; m_2 – приведенная масса подвесной части состава. Углы θ и φ являются обобщенными координатами рассматриваемой системы.

Уравнение частот главных колебаний будет

$$\begin{vmatrix} c_{11} - a_{11}\omega_\varphi^2 & c_{12} - a_{12}\omega_\varphi^2 \\ c_{21} - a_{21}\omega_\varphi^2 & c_{22} - a_{22}\omega_\varphi^2 \end{vmatrix} = 0,$$

где ω_φ – частота продольных колебаний;

a_{ij} – коэффициенты квадратичной формы (при $i, j = 1; 2$), соответствующие кинетической энергии рассматриваемой системы, равной

$$T = \frac{1}{2} (c_{11}\dot{q}_1^2 + 2a_{12}q_1q_2 + c_{22}\dot{q}_2^2);$$

\dot{q}_i – обобщенная скорость системы ($i = 1, 2$);

c_{ij} – коэффициенты квадратичной формы (при $i, j = 1; 2$), соответствующие потенциальной энергии системы, которая

$$U = \frac{1}{2} (c_{11}q_1^2 + 2c_{12}q_1q_2 + c_{22}q_2^2);$$

q_i – обобщенная координата системы ($i = 1; 2$).

Уравнение частот представим в виде

$$(a_{11}a_{22} - a_{12}^2)\omega_\phi^4 - (a_{11}c_{22} + a_{22}c_{11} - 2a_{12}c_{12})\omega_\phi^2 + c_{11}c_{22} - c_{12}^2 = 0.$$

Кинетическая энергия системы может быть найдена как сумма кинетических энергий масс m_1 и m_2

$$T = \frac{m_1 \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2},$$

где \dot{x}_1, \dot{x}_2 – скорости масс m_1 и m_2 , соответственно.

Для массы m_1 имеем

$$\dot{x}_1 = l_c \dot{\vartheta}.$$

Скорость массы m_2 определяется как сумма векторов относительной и переносной скоростей. Модуль относительной скорости равен $h_c \dot{\phi}$, а переносной – $l_c \dot{\vartheta}$.

Тогда для массы m_2

$$\dot{x}_2^2 = l_c^2 \dot{\vartheta}^2 + h_c^2 \dot{\phi}^2 + 2l_c h_c \dot{\vartheta} \dot{\phi} \cos(\varphi - \vartheta).$$

Отсюда

$$T = \frac{1}{2} \left((m_1 + m_2) l_c^2 \dot{\vartheta}^2 + m_2 h_c^2 \dot{\phi}^2 + 2m_2 l_c h_c \dot{\vartheta} \dot{\phi} \cos(\varphi - \vartheta) \right).$$

Для малых колебаний имеем

$$T = \frac{1}{2} \left((m_1 + m_2) l_c^2 \dot{\vartheta}^2 + m_2 h_c^2 \dot{\phi}^2 + 2m_2 l_c h_c \dot{\vartheta} \dot{\phi} \right).$$

Потенциальная энергия, определяемая силами тяжести масс m_1 и m_2 , будет

$$U = -m_1 g l_c \cos \vartheta - m_2 g (l_c \cos \vartheta + h_c \cos \varphi).$$

Для малых колебаний потенциальная энергия равна

$$U = \frac{1}{2} \left((m_1 + m_2) g l_c \vartheta^2 + m_2 g h_c \phi^2 \right).$$

Из выражений кинетической и потенциальной энергий получаем следующие коэффициенты квадратичной формы

$$\begin{aligned} a_{11} &= (m_1 + m_2)l_c^2; a_{12} = m_2 l_c h_c; a_{22} = m_2 h_c^2; \\ c_{11} &= (m_1 + m_2)gl_c; c_{12} = 0; c_{22} = m_2 g h_c. \end{aligned}$$

Используя найденные коэффициенты, уравнение частот главных колебаний имеет вид

$$m_1 l_c h_c \omega^4 - (m_1 + m_2)(l_c + h_c)g \omega^2 + (m_1 + m_2)g^2 = 0.$$

Введем обозначения:

$$n_{\varphi 1}^2 = \frac{g}{l_c}; \quad n_{\varphi 2}^2 = \frac{g}{h_c}; \quad \mu_{\varphi}^2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}.$$

Тогда частоты главных колебаний рассматриваемой системы будут

$$\begin{aligned} \omega_{\varphi 1} &= \sqrt{\frac{n_{\varphi 1}^2 + n_{\varphi 2}^2 - \sqrt{(n_{\varphi 1}^2 + n_{\varphi 2}^2)^2 - 4n_{\varphi 1}^2 n_{\varphi 2}^2 (1 - \mu_{\varphi}^2)}}{2(1 - \mu_{\varphi}^2)}}; \\ \omega_{\varphi 2} &= \sqrt{\frac{n_{\varphi 1}^2 + n_{\varphi 2}^2 + \sqrt{(n_{\varphi 1}^2 + n_{\varphi 2}^2)^2 - 4n_{\varphi 1}^2 n_{\varphi 2}^2 (1 - \mu_{\varphi}^2)}}{2(1 - \mu_{\varphi}^2)}}. \end{aligned}$$

Графическая зависимость главных частот колебаний системы $\omega_{\varphi 1}$, $\omega_{\varphi 2}$ от расстояния h_c при различной высоте подвески монорельсового пути изображена на рис. 2, а. Приведенные зависимости приведены для случая, когда $m_1 = 0,5$ т; $m_2 = 8,0$ т.

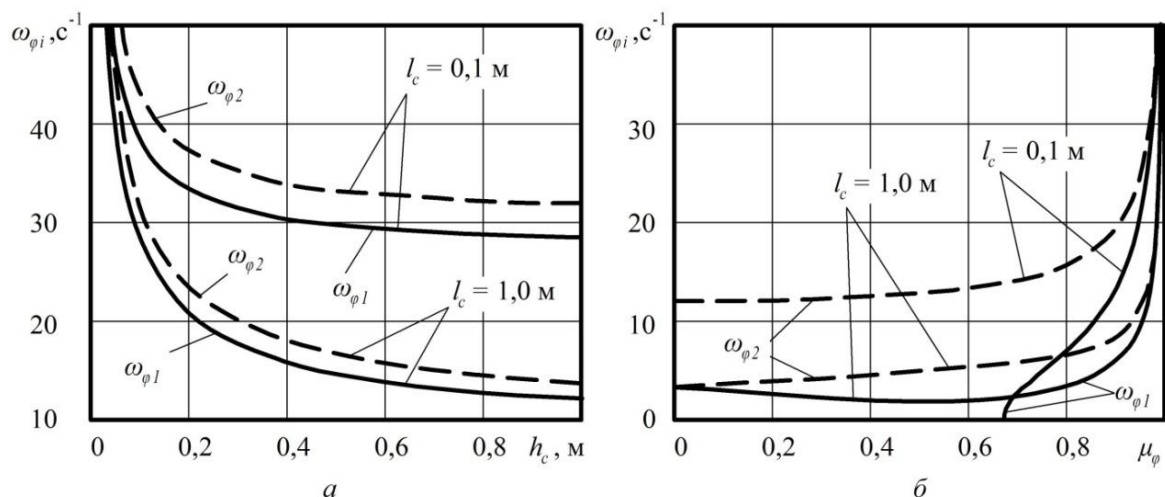


Рис. 2. Зависимости изменения главных частот колебаний системы:

$$a - \omega_{\varphi i} = f(h_c); \quad б - \omega_{\varphi i} = f(\mu_{\varphi})$$

Графики показывают, что с увеличением h_c первая и вторая частоты снижаются, достигая своих наименьших значений, когда $h_c \geq 1$ м. При $l_c = 0,1$ м наименьшее значение частоты $\omega_{\varphi 1}$ составляет около 28 с^{-1} , $\omega_{\varphi 2} - 32 \text{ с}^{-1}$ и разница между ними составляет не более 15%. При $l_c = 1,0$ м наименьшее значение частоты $\omega_{\varphi 1}$ приближается к 14 с^{-1} , а $\omega_{\varphi 2} - 12 \text{ с}^{-1}$. В этом случае разница между указанными значениями первых и вторых частот также не превышает 15%.

На рис. 2,б показаны зависимости изменения главных частот колебаний от коэффициента μ_φ , полученные для подвижного состава, имеющего $h_c = 1$ м. Из графиков видно, что с повышением μ_φ первая и вторая частоты колебаний системы увеличиваются, стремясь к своему максимуму при $\mu_\varphi = 1$.

Графические зависимости изменения главных частот колебаний системы от массы подвесной части подвижного состава приведены на рис. 3.

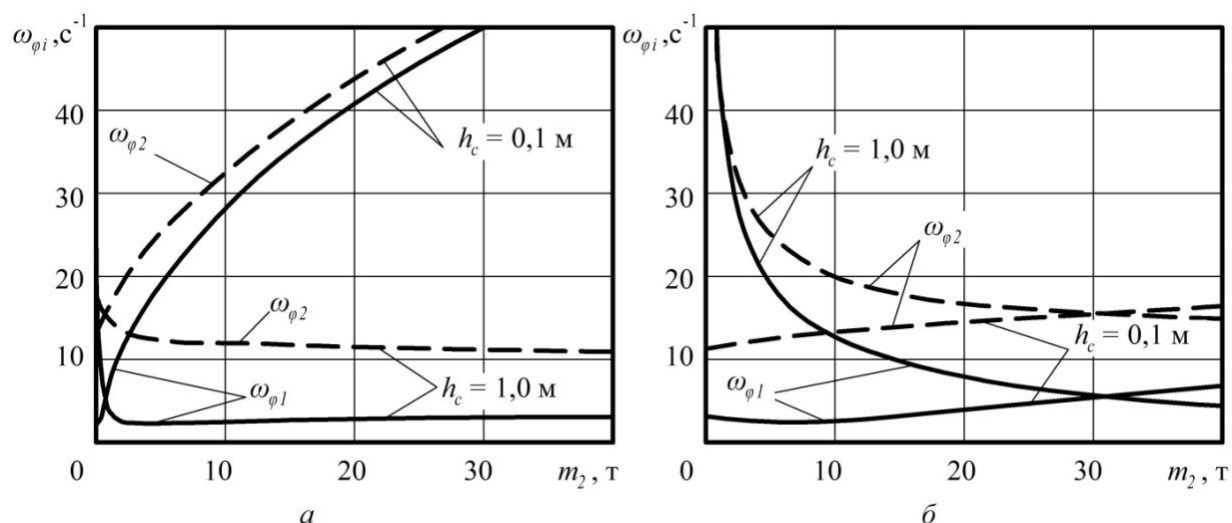


Рис. 3. Зависимости изменения главных частот колебаний системы от массы подвесной части подвижного состава: а – для $m_1 = 0,8$ т; б – для $m_1 = 32,0$ т

Из этих рисунков видно, что для малых масс $m_1 = 0,8$ т при $h_c = 0,1$ м с повышением m_2 первая и вторая частоты довольно интенсивно увеличиваются. При $h_c = 1,0$ м с повышением m_2 первая и вторая частоты вначале интенсивно уменьшаются, а затем при $m_2 \geq 2,0$ – стабилизируются. Для $m_1 = 32,0$ т, когда $h_c = 0,1$ м, с увеличением m_2 главные частоты $\omega_{\varphi 1}$ и $\omega_{\varphi 2}$ практически не изменяются, но при $h_c = 1,0$ м происходит их резкое снижение.

4. Заключение

Разработанная математическая модель продольных колебаний подвесной монорельсовой дороги при торможении позволяет установить взаимосвязь между параметрами монорельсового пути и подвижного состава. В результате получено уравнение частот главных колебаний и найдены частоты главных колебаний рассматриваемой.

Полученные результаты позволят обоснованно устанавливать параметры крепления монорельса шахтных подвесных монорельсовых дорог. В дальнейшем планируется провести экспериментальные исследования колебаний подвижного состава монорельсовой дороги в условиях эксплуатации.

Список литературы:

1. Баус-Нойфанг Б. Подвесные и напочвенные дизель-гидравлические локомотивы для перемонтажей механизированных комплексов «тяжелого» класса / Б. Баус-Нойфанг, Д.В. Великанов, Ю. Русинек // Уголь. – 2011. – №2. – С. 19-21. ISSN 0041-5790.
2. Ширин Л.Н. Оценка эксплуатационных параметров подвесных монорельсовых дорог / Л.Н. Ширин, Л.Н. Посуныко, В.А. Расцветаев // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 76. – С. 91–96. ISSN 1607-4556.
3. Блохин Е. П. Динамика поезда: (Нестационарные продольные колебания): монография / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. – М.: Транспорт, 1982. – 222 с.
4. Гарг В.К. Динамика подвижного состава / К.А. Гарг, Р.В. Дуккипати; под ред. Панькина. – М.: Транспорт, 1988. – 391 с. ISBN 5277-00226X.
5. Зіборов К.А. Математична модель шахтної вагонетки з додатковою кінематичною рухливістю ходової частини / К.А. Зіборов, С.О. Федоряченко // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – №32. – С.149–154. ISSN 2306-5451.
6. Проців В.В. О формировании кинематических и динамических параметров выходных звеньев шахтных транспортных средств в переходном режиме движения / В.В. Проців, К.А. Зиборов, С.А. Федоряченко // Науковий вісник НГУ. – 2013. – № 4. – С. 64–70. ISSN 2071-2227.
7. Гутаревич В.О. Динамика шахтных подвесных монорельсовых дорог: монография / В.О. Гутаревич. – Донецк: ЛАНДОХ-XXI, 2014. – 206 с. ISBN 978-617-7049-81-3.

Надійшла до редколегії 25.12.2014.

V.O. Gutarevych

LONGITUDINAL OSCILLATIONS OF MINE SUSPENDED MONORAIL UNDER BRAKING

In the article were estimated a relationship between parameters of monorail track and rolling stock braking shaft hanging monorail. A mathematical model oscillations of mentioned parts of the road as a system of elastic bodies connected with each other was created. A theoretical study of the longitudinal oscillations that occur during braking rolling stock and the main oscillation frequency of the system were found. The obtained results allow to set reasonable parameters monorail mounting suspended monorail.

Key words: monorail, road, oscillations, mathematical model, frequency.

В.О. Гутаревич

ПОЗДОВЖНІ КОЛИВАННЯ ШАХТНОЇ ПІДВІСНОЇ МОНОРЕЙКОВОЇ ДОРОГИ ПРИ ГАЛЬМУВАННІ

У статті встановлено взаємозв'язок між параметрами монорейки та рухомого складу при гальмуванні шахтної підвісної монорельсової дороги. Розроблено математичну модель коливань частин дороги як системи пружних тіл, пов'язаних між собою. Проведено теоретичні дослідження поздовжніх коливань, які виникають під час гальмування рухомого складу. Знайдено частоти головних коливань розглянутої системи. Отримані результати дозволять обґрунтовано встановлювати параметри кріплення монорейки шахтних підвісних монорейкових доріг.

Ключеві слова: монорейка, дорога, коливання, математична модель, частота.