

УДК 622.625.6

В.О. Гутаревич (канд. техн. наук, доц.),
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ЭКИПАЖА И ПОДВЕСНОГО ПУТИ ШАХТНОЙ МОНОРЕЛЬСОВОЙ ДОРОГИ

В статье рассмотрены упругие колебания монорельса при движении экипажа шахтной подвесной монорельсовой дороги. Составлена математическая модель колебаний и даны рекомендации по выбору параметров подвески монорельса.

Ключевые слова: колебания, монорельс, экипаж, математическая модель, монорельсовая подвесная дорога.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Подвесные монорельсовые дороги находят все большее применение в горной промышленности. Экипажи этих дорог перемещаются по подвесному монорельсу, состоящему из отдельных секций, соединенных между собой болтами, штифтами или захватами, с возможностью незначительного перемещения относительно друг от друга.

На горизонтальных участках пути каждая секция подвешивается к арочной крепи или кровле в двух точках с помощью цепных, канатных или стержневых подвесок. Кроме того, для предотвращения бокового раскачивания монорельса, с каждой его стороны устанавливаются растяжки, как правило, на каждой десятой секции. В наклонных выработках монорельс раскрепляется не менее чем в четырех точках. Это дает возможность применять монорельсовый транспорт в современных сложных условиях ведения горных работ, когда деформируется не только крепь выработки, но и путь.

Поскольку монорельс имеет неровности и соединения, допускающие зазоры и перекосы в разных плоскостях, то во время движения экипажа появляются дополнительные ударные воздействия, которые передаются на подвеску монорельсовой дороги, что дополнительно увеличивает нагрузку на крепь, снижая ее прочность. Поэтому исследование процесса взаимодействия подвесного экипажа с монорельсом является актуальной задачей.

Анализ исследований и публикаций. Исследованию особенностей взаимодействия массива горных пород с арочной крепью в вы-

работках с подвесной монорельсовой дорогой посвящено ряд работ [1, 2]. В работах [3, 4, 5] рассматриваются вопросы совершенствования и обоснования параметров подвесных монорельсовых дорог. Исследование динамики пути и его взаимодействие с подвижным составом проведено в [6, 7, 8, 9].

Постановка задачи. Данная работа является продолжением указанных исследований. Цель статьи заключается в установлении взаимосвязи между параметрами подвесного экипажа и монорельса с учетом упругости его подвесок.

Изложение материала и результаты.

Во время движения одиночного экипажа по подвесному монорельсу, состоящему из связанных между собой секций, возникают вертикальные колебания. Монорельс можно представить в виде периодической структуры, количество элементов которой определяется количеством взаимодействующих с экипажем секций ξ .

Рассмотрим двухмассовую модель вертикальных колебаний, показанную на рис.1, где приняты следующие обозначения: m_1 – приведенная масса монорельса, устанавливаемая с учетом количества ξ ; m_2 – приведенная масса экипажа; c_1 – коэффициент жесткости подвески монорельса; c_2 – коэффициент жесткости подвески экипажа; b – коэффициент демпфирования подвески монорельса; $\mu(t)$ – возмущающее воздействие; y_1 , y_2 – обобщенные координаты перемещения центров масс монорельса и экипажа, соответственно.

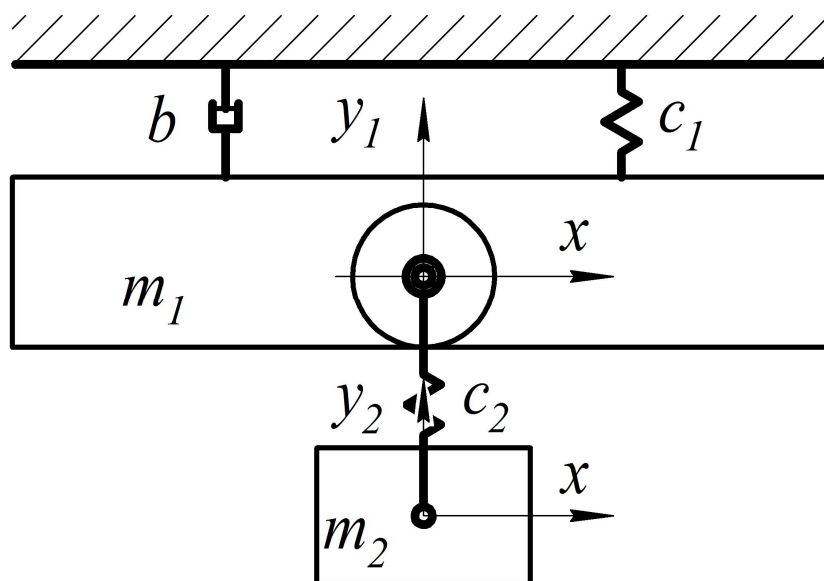


Рис. 1 – Расчетная схема взаимодействия подвесного экипажа с монорельсом

В случае воздействия на рассматриваемую систему возмущений в виде единичной функции Дирака с импульсом силы, пропорциональным жесткости подвески экипажа, уравнения колебаний имеют вид

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1 + 2\lambda\dot{y}_1 + \omega_1^2 y_1 + k_m \omega_2^2 (y_1 - y_2) &= 0; \\ \ddot{y}_2 + \omega_2^2 (y_2 - y_1) &= \frac{1}{m_2} \mu(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\lambda = \frac{b}{2m_1}$; $k_m = \frac{m_2}{m_1}$;

ω_1 – частота собственных колебаний монорельса; $\omega_1 = \sqrt{\frac{c_1}{m_1}}$;

ω_2 – частота собственных колебаний экипажа; $\omega_2 = \sqrt{\frac{c_2}{m_2}}$.

Рассмотрим колебания, происходящие в начальный момент времени $t = 0$, когда $y_1 = \dot{y}_1 = 0$; $\dot{y}_2 = 0$. Произведем преобразования Лапласа выражения (1) и получим отображение координаты перемещения экипажа

$$y_2(p) = \frac{(p_0^2 + 2\lambda p_0 + \omega_1^2 + k_m \omega_2^2) \omega_2^2}{p_0^2 + 2\lambda p_0^2 + (\omega_1^2 + k_m \omega_2^2 + \omega_2^2) p_0^2 + 2\lambda \omega_2^2 p_0 + \omega_1^2 \omega_2^2}, \quad (2)$$

где p_0 - символ преобразования Лапласа.

Выражение (2) приведем к безразмерному виду

$$y_2(p) = \frac{q_0 + q_1 p + q_2 p^2 + q_3 p^2}{d_0 + d_1 p + d_2 p^2 + d_3 p^3 + d_4 p^4}, \quad (3)$$

где $q_0 = 0$; $q_1 = k_m + \varepsilon^2$; $q_2 = 2\eta$; $q_3 = 1$; $p = \frac{p_0}{\omega_2}$;

$d_0 = \varepsilon^2$; $d_1 = 2\eta$; $d_2 = 1 + k_m + \varepsilon^2$; $d_4 = 1$;

ε, η - безразмерные коэффициенты частоты подвески монорельса и демпфирования, соответственно;

$$\varepsilon = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad \eta = \lambda.$$

Входящие в выражение (3) параметры k_m, ε и η устанавливаются конструкцией экипажа, монорельса и его подвески. Для установления

взаимосвязи между ними используем интегральный функционал [10]:

$$J_1 = \frac{\varepsilon^2 - 2\varepsilon + 4\eta^2 + k_m^2 + k_m + 1}{4\varepsilon^2\eta k_m}. \quad (4)$$

Минимальной интегральной оценке (4) соответствует минимальное время переходного процесса колебаний динамической системы.

Найдем минимальную ее интегральную оценку, используя условие

$$\frac{\partial J_1}{\partial \varepsilon} = 0; \quad \frac{\partial J_1}{\partial \eta} = 0; \quad \frac{\partial J_1}{\partial k_m} = 0.$$

Для этих условий система может быть представлена как

$$\begin{cases} \varepsilon^4 - 4\eta^2 - k_m^2 - k_m - 1 = 0; \\ 4\eta^4 + 2\varepsilon^2 - \varepsilon^4 - k_m(k_m^2 + k_m + 1) = 0; \\ 2\varepsilon^2 - \varepsilon^4 - 4\eta^2 + k_m - 1 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

На основании этого найдем значения параметров, при которых функционал J_1 принимает наименьшее значение

$$\varepsilon_0 = \sqrt{\frac{k_m^3 + 2k_m^2 + 2k_m + 1}{2}}; \quad (6)$$

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{k_m^6 + 4k_m^5 + 8k_m^4 + 10k_m^3 + 4k_m^2 - 3}{16}}. \quad (7)$$

Аналогично, с учетом упругости подвески, интегральный функционал равен

$$J_2 = \frac{4\eta^2 + k_m + 1}{4\eta k_m}. \quad (8)$$

Проведем анализ полученных выражений. График зависимости параметров подвески от соотношения приведенных масс подвесного монорельса и экипажа приведен на рис. 2.

Из графиков на рис.2а видно, что с повышением k_m коэффициенты ε_0 и η_0 увеличиваются. Для $k_m \leq 1,2$ значения коэффициентов довольно близки, но при дальнейшем повышении k_m разница делается существенной, причем за счет более интенсивного роста η_0 .

Важной оценкой является соотношение функционалов, равное $k_0 = J_1/J_2$. График зависимости соотношения функционалов k_0 от η

показан на рис.2б. Приведенные на этом графике зависимости получены для разных значений k_m от 0,1 до 1,2. Видно, что для $k_m = 0,1$ с ростом η соотношение k_0 увеличивается, а следовательно, эффективность гашения колебаний снижается. При k_m , равном 0,6...0,8 изменение η влияет не существенно. Для $k_m \geq 1,0$ при повышении η эффективность гашения колебаний увеличивается.

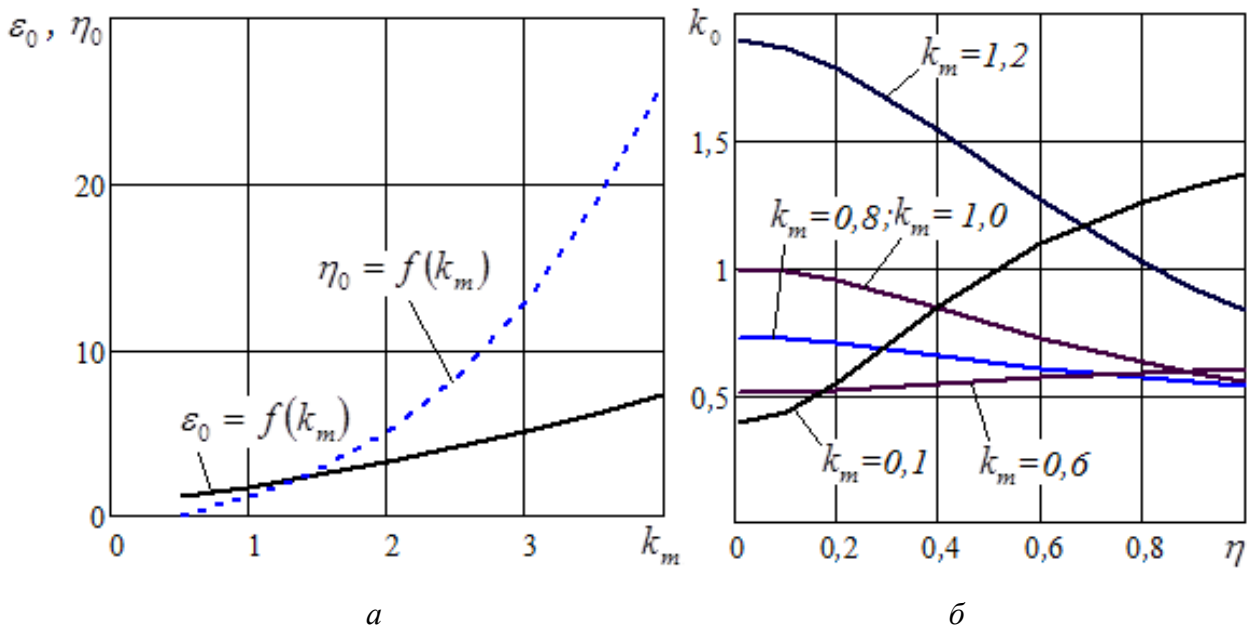


Рис. 2 – Графические зависимости: *a* – параметров подвески от соотношения приведенных масс подвесного монорельса и экипажа; *б* – соотношения функционалов от коэффициента демпфирования подвески монорельса

В качестве примера рассмотрим колебания экипажа на монорельсе для следующих значений входящих параметров: $k_m = 0,75$, $\omega_1 = 20 \text{ с}^{-1}$; $\omega_2 = 40 \text{ с}^{-1}$ и начальных условиях $y_1(0) = \dot{y}_1(0) = \dot{y}_2(0) = 0$; $y_2(0) = 0,001$ (рис. 3). Отсюда видно, что при заданных параметрах и коэффициенте демпфирования $\lambda = 0,1$ колебания носят слаботухающий характер. С увеличением этого коэффициента до 5,0 значительно уменьшается время переходного процесса, снижаются амплитуды колебаний подвесного монорельса и экипажа.

Следует отметить, что для заданных условий при увеличении приведенной массы экипажа уменьшается амплитуда колебаний монорельса. Причем, если при $m_2 = 0,8 \text{ т}$ максимальная амплитуда равна 0,98 мм, то при $m_2 = 6,0 \text{ т}$ – не более 0,2 мм.

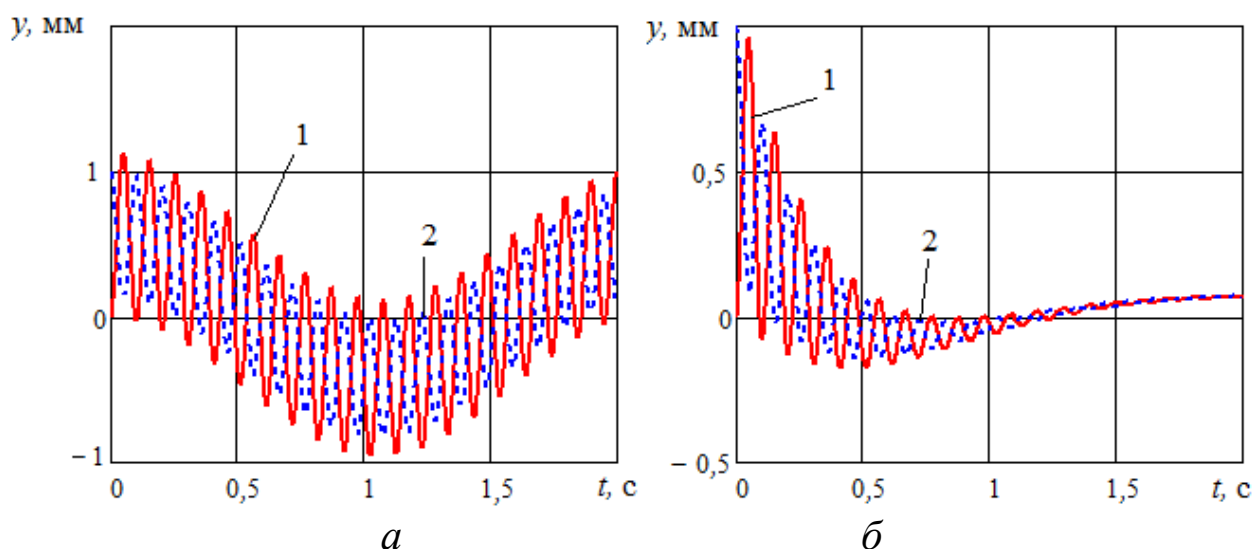


Рис. 3 – Зависимости изменения во времени амплитуды колебаний монорельса 1 и экипажа 2 для разных значений коэффициента демпфирования: $a - \lambda = 0,5$; $b - \lambda = 5$

Выводы и направления дальнейших исследований.

Полученные зависимости, устанавливающие взаимосвязь между параметрами подвешенного монорельсового пути с экипажем будут использоваться для обоснованного выбора параметров монорельсовых дорог. В дальнейшем планируется провести теоретические исследования с учетом колебаний монорельсового поезда, которые обусловлены действием сцепок.

Список литературы

1. Расцветаев В.А. Особенности формирования дополнительных нагрузок на арочную крепь участковых выработок с подвесными монорельсовыми дорогами / В.А. Расцветаев // Науковий вісник НГУ. – 2011. – № 4. – С. 35-38.
2. Ширин Л.Н. Исследование особенностей взаимодействия массива горных пород с арочной крепью в выработках с подвесной монорельсовой дорогой / Л.Н. Ширин, В.А. Расцветаев, А.Л. Лебедь // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 11-12. – С. 52-54.
3. Ширин Л.Н. Оценка эксплуатационных параметров подвесных монорельсовых дорог / Л.Н. Ширин, Л.Н. Посунько, 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.
4. Баус-Нойфанг Б. Подвесные и напочвенные дизель-гидравлические локомотивы для ремонтно-монтажных механизированных комплексов «тяжелого» класса / Б. Баус-Нойфанг, Д.В. Великанов, Ю. Русинек // Уголь. – 2011. – №2. – С. 9-21.
5. Ногих В.Р. Современный формат подвесных монорельсовых транспортных систем / В.Р. Ногих // Уголь. – 2006. – №4. – С. 34-36.
6. Титов А.А. Анализ вариантов взаимодействия системы колесо-вагонетка при наезде на стык рельсов / А.А. Титов, В.Ф. Ганкевич, А.Н. Коцупей // Науковий вісник НГУ. – 2009. – № 3. – С. 68-71.

7. Коцупей А.Н. Обоснование параметров периодического взаимодействия колеса вагонетки со стыками протяженного рельсового пути / А.Н. Коцупей, А.А. Титов, В.Ф. Ганкевич // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 1. – С. 65-68.
8. Шахтарь П.С. Рудничные локомотивы (динамика и расчет) / П.С. Шахтарь. – М.: Недра, 1982. – 296 с.
9. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А.Я. Коган. – М: Транспорт, 1997. – 326 с.
10. Кузнецов Н.К. Гашение упругих колебаний управляемой машины с помощью дополнительных упругих элементов / Н.К. Кузнецов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. ИРГУПС. – 2008. – №17. – С. 34-37.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2013

В.О. Гутаревич. ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Дослідження пружних коливань екіпажу та підвісного шляху шахтної монорейкової дороги

В статті розглянуто пружні коливання монорейки під час руху екіпажу шахтної підвісної монорейкової дороги. Складено математичну модель коливань та наведено рекомендації з вибору параметрів підвіски монорейки.

Ключові слова: коливання, монорейка, екіпаж математична модель, монорейкова підвісна дорога.

V. Gutarevych. Donetsk National Technical University

A Study of Elastic Vibrations of the Vehicle and Hanging Rail of Mine Monorail

The paper considers elastic vibrations of the monorail when the vehicle is moving. A mathematical model is developed and the recommendations for selecting parameters of the monorail are given.

Keywords: fluctuations, monorail, crew, mathematical model, monorail suspension railway.