

УДК 622.625.6

В.О. Гутаревич (канд. техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет, Донецк

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ И ФОРМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОДВЕСНОГО ПУТИ ШАХТНОЙ МОНОРЕЛЬСОВОЙ ДОРОГИ

В работе рассмотрено влияние продольной фиксации монорельса на боковое раскачивание подвесной монорельсовой дороги, происходящее во время ее движения. Получено уравнение свободных колебаний механической системы. Установлены циклическая частота и период свободных колебаний подвешенного подвижного состава

Ключевые слова: подвесная монорельсовая дорога, монорельсовый путь, подвижной состав, боковое раскачивание, математическая модель.

Постановка проблемы. Во время движения шахтной подвесной монорельсовой дороги неизбежно возникает боковое раскачивание ее элементов. Это объясняется тем, что дорога шарнирно подвешивается к кровле горной выработки или верхнякам крепи, а ее подвижной состав располагается под монорельсом.

Для снижения бокового раскачивания целесообразно применять фиксацию монорельса с помощью растяжек, устанавливаемых по его обе стороны. При этом амплитуда бокового раскачивания будет определяться, главным образом, количеством растяжек и их жесткостью.

Анализ и результаты исследований. Научные работы [1, 2, 3, 4] посвящены исследованию параметров подвесных монорельсовых дорог, сооружений и направлены на совершенствование конструкций и улучшение показателей работы. Вопросы влияния продольной фиксации монорельсового пути в шахтных условиях в литературе не приводятся.

Цель статьи заключается в установлении взаимосвязи между параметрами монорельсовой дороги и подвеской монорельса, имеющей продольные связи. Полученные результаты послужат основой для разработки методики расчета подвески шахтной монорельсовой дороги.

Материалы и результаты исследования. Подвесная монорельсовая дорога может быть представлена в виде материальной точки массой m_1 , которая располагается на подвеске массой m_2 и длиной l_p (рис.1). Для снижения амплитуды бокового раскачивания подвижного состава к монорельсу на расстоянии h прикреплены растяжки, имеющие коэффициент жесткости c_p .

Рассматриваемая механическая система имеет одну степень свободы, за обобщенную координату которой принимаем угол φ , образованный осью подвески с вертикалью. Система находится под действием консервативных сил – сил тяжести и упругости. Для получения дифференциального уравнения движения воспользуемся уравнением Лагранжа второго рода для консервативной системы

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = - \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi}, \quad (1)$$

где T , Π – кинетическая и потенциальная энергии механической системы, соответственно.

Кинетическую энергию системы найдем как сумму кинетической энергии подвески T_1 , вращающейся вокруг оси Ox , и кинетической энергии подвесной монорельсовой дороги T_2 .

Тогда

$$T_1 = \frac{1}{2} J_x \dot{\varphi}^2, \quad (2)$$

где J_x – момент инерции подвески, который для подвески в виде однородного стержня равен $J_x = \frac{1}{3} m_2 l_p^2$.

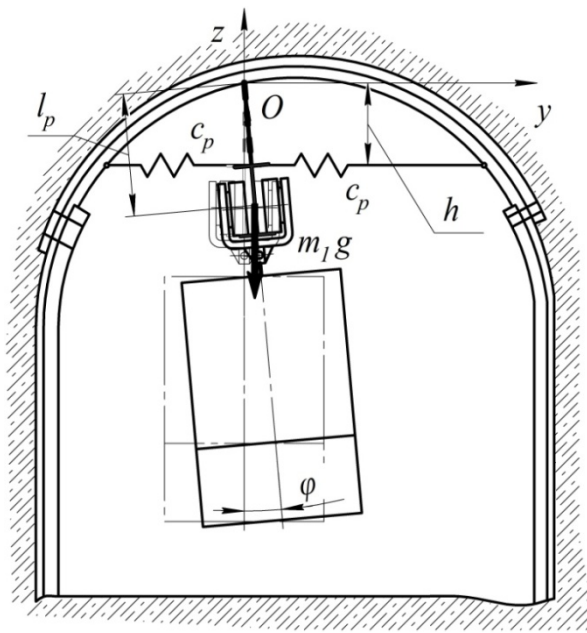


Рис. 1. Расчетная схема бокового раскачивания монорельсовой дороги в горной выработке

Отсюда

$$T_1 = \frac{1}{6} m_2 l_p^2 \dot{\varphi}^2. \quad (3)$$

Кинетической энергия подвесной монорельсовой дороги

$$T_2 = \frac{1}{2} m_1 l_p^2 \dot{\varphi}^2. \quad (4)$$

Кинетической энергия рассматриваемой механической системы

$$T = T_1 + T_2 = \frac{1}{6} (3m_1 + m_2) l_p^2 \dot{\varphi}^2. \quad (5)$$

Установим потенциальную энергию механической системы при ее отклонении на малый угол φ как сумму потенциальной энергии Π_1 , соответствующей силам тяжести, и Π_2 , соответствующей силам упругости

$$\Pi_1 = g(m_1 h_1 + m_2 h_2), \quad (6)$$

Где h_1, h_2 – вертикальные перемещения вверх центров тяжести масс m_1 и m_2 , возникающие при повороте на угол φ

$$h_1 = l_p (1 - \cos \varphi);$$

$$h_2 = \frac{l_p}{2} (1 - \cos \varphi).$$

Тогда

$$\Pi_1 = g l_p \left(m_1 + \frac{m_2}{2} \right) (1 - \cos \varphi). \quad (7)$$

При повороте системы на угол φ одна из растяжек удлиняется, а другая укорачивается на длину δ , которая с точностью до величин первого порядка малости будет $\delta = h\varphi$. Поэтому потенциальная энергия Π_2 может быть определена как работа суммарной реакции сил, возникающих при деформации растяжек

$$\Pi_2 = 2 \frac{c_p \delta^2}{2} = c_p h^2 \varphi^2. \quad (8)$$

Суммарная потенциальная энергия рассматриваемой механической системы

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 = g l_p \left(m_1 + \frac{m_2}{2} \right) (1 - \cos \varphi) + c_p h^2 \varphi^2. \quad (9)$$

Учитывая, что $(1 - \cos \varphi) = 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}$ и, ограничиваясь малыми величинами второго порядка, имеем

$$\Pi = \left[\frac{g l_p}{2} \left(m_1 + \frac{m_2}{2} \right) + c_p h^2 \right] \varphi^2. \quad (10)$$

После нахождения производных выражений (5), (10), их подстановки в уравнение (1) и преобразований получим

$$\frac{1}{3} (3m_1 + m_2) l_p^2 \ddot{\varphi} = - \left[\frac{g l_p}{2} \left(m_1 + \frac{m_2}{2} \right) + 2c_p h^2 \right] \varphi^2,$$

или

$$\ddot{\varphi} + \frac{3 \left[g l_p \left(m_1 + \frac{m_2}{2} \right) + 2c_p h^2 \right]}{(3m_1 + m_2) l_p^2} \varphi = 0. \quad (11)$$

Полученное выражение (11) является дифференциальным уравнением малых свободных колебаний механической системы. Поэтому циклическая частота свободных колебаний подвесной монорельсовой дороги равна

$$k = \frac{1}{l_p} \sqrt{\frac{3 \left[gl_p \left(m_1 + \frac{m_2}{2} \right) + 2c_p h^2 \right]}{3m_1 + m_2}}. \quad (12)$$

Период свободных колебаний подвесной монорельсовой дороги можно найти

$$T = \frac{2\pi}{k} = 2\pi l_p \sqrt{\frac{3m_1 + m_2}{3 \left[gl_p \left(m_1 + \frac{m_2}{2} \right) + 2c_p h^2 \right]}}. \quad (13)$$

На рис. 2 приведены графики изменения амплитуды бокового раскачивания во времени для различных значений коэффициента жесткости c_p , полученные при следующих параметрах подвесной монорельсовой дороги: $m_1 = 2000$ кг; $m_2 = 200$ кг; $l_p = 0,35$ м; $h = 0,3$ м. Из сравнения этих графиков видно, что с увеличением c_p от $0,1 \times 10^5$ до 3×10^5 Н/м значение амплитуды уменьшается с 0,17 до 0,058 рад. Кроме этого изменяются циклическая частота и период колебаний подвижного состава монорельсовой дороги.

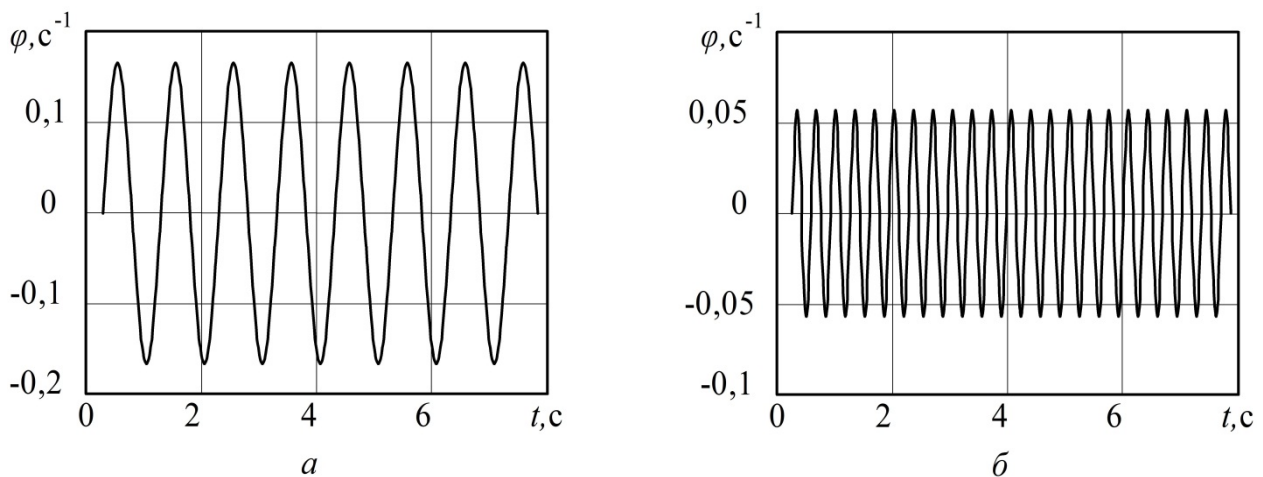


Рис.2. Графические зависимости $\varphi = f(t)$:
 а – при $c_p = 0,1 \times 10^5$ Н/м; б – при $c_p = 3 \times 10^5$ Н/м

Графики зависимости циклической частоты (12) и периода колебаний (13) от жесткости подвесок представлены на рис.3. Они построены для ранее указанных параметров монорельсовой дороги, но при длине подвеса монорельса 0,35 и 1,8 м. Указанные длины являются предельными, поскольку ограничиваются размерами поперечных сечений горных выработок.

Как видно из рис.3а, увеличение коэффициента жесткости растяжек монорельсового пути от 0 до 4×10^7 Н/м при $l_p = 0,35$ м сопровождается повышением частоты колебаний с 5,3 до 57,1 Гц, а при $l_p = 1,8$ м – с 2,3 до 56,9 Гц. Для периода колебаний (рис.3б) характерно снижение в диапазонах с 1,19 до 0,11 с при $l_p = 0,35$ м, для $l_p = 1,8$ м уменьшение с 2,7 до 0,1 с.

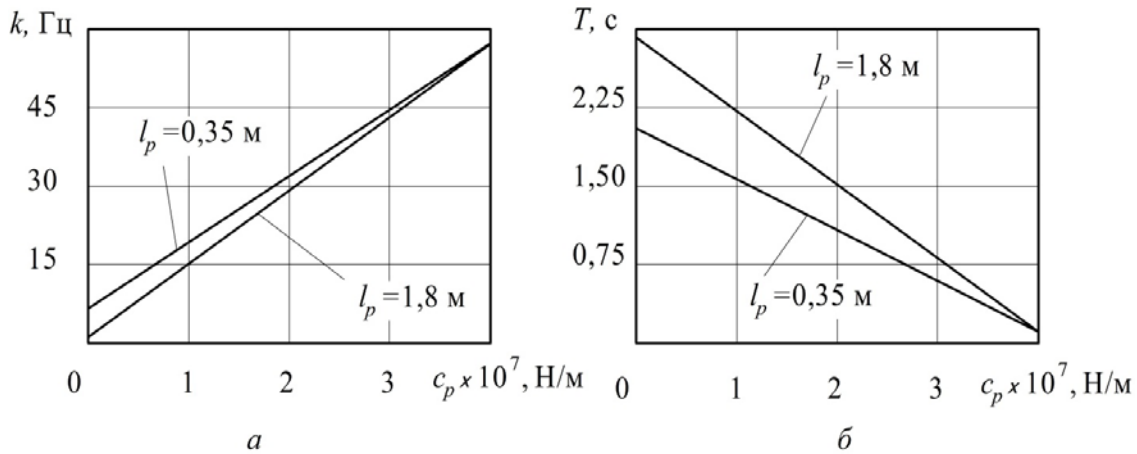


Рис.3. Зависимости: а – $k = f(c_p)$; б – $T = f(c_p)$

Зависимости циклической частоты k и периода колебаний T от длины подвеса монорельсового пути l_p при различных значениях масс подвижного состава m_1 приведены на рис.4. Из графиков следует, что длина l_p существенно влияет на частоты и период колебаний. Для $m_1 = 200$ кг (рис.4а) при увеличении длины l_p с 0,1 до 1,8 м частоты снижаются с 985 до 49 Гц. Причем, в диапазоне длины l_p от 0,1 до 1,0 м происходит снижение частоты более чем в 10 раз, а при дальнейшем увеличении l_p частота практически не изменяется. Для $m_1 = 20000$ кг при росте длины l_p с 0,1 до 1,8 м частоты уменьшаются с 114 до 6 Гц. При этом с увеличением l_p более 0,5 м частота колебаний остается практически неизменной.

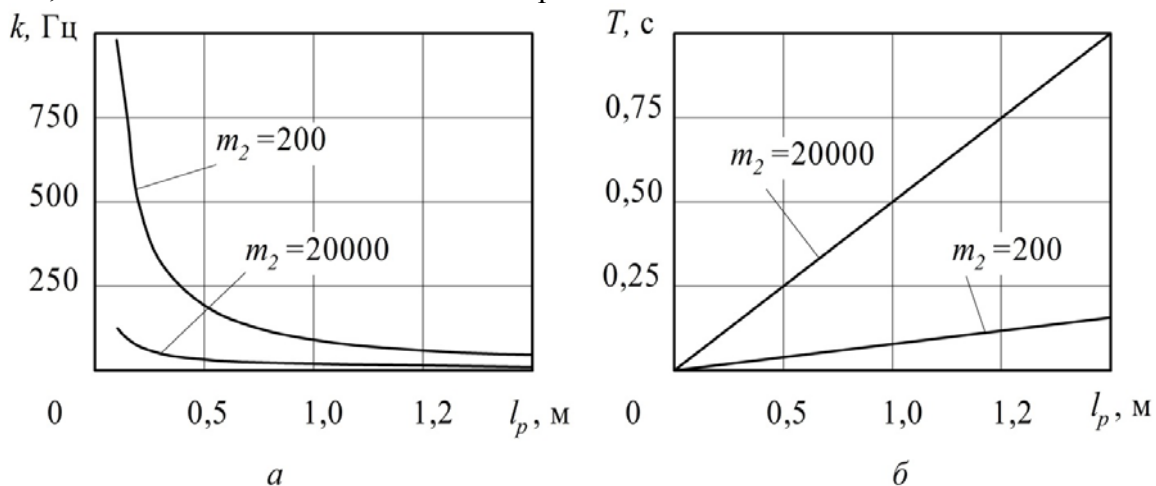


Рис.4. Зависимости: а – $k = f(l_p)$; б – $T = f(l_p)$

На рис.4б видно, что повышением длины l_p наблюдается увеличение периода колебаний T . Так при $m_1 = 200$ кг с изменением l_p в диапазоне от 0,1 до 1,8 м период колебаний не превышает 0,1 с, а при $m_1 = 20000$ кг – достигает 1,0 с. Следует отметить, что приведенные результаты получены при $h = 0,9l_p$ и коэффициенте

жесткости $c_p = 2 \times 10^5$ Н/м. Для других значений этих параметров, относящихся к существующим подвесным монорельсовым дорогам, зависимости циклической частоты и периода колебаний от длины подвеса монорельсового пути l_p имеют близкие результаты.

Выводы, перспективы развития вопроса

Полученная математическая модель, учитывающая взаимосвязь между параметрами монорельсовой дороги и подвесной монорельса, имеющей продольные связи, будет использована для усовершенствования существующих и вновь проектируемых монорельсовых дорог. Результаты исследования послужат основой для разработки методики расчета подвески шахтной монорельсовой дороги. В дальнейшем, для уточнения полученных зависимостей, планируется провести теоретические исследования с учетом вынужденных колебаний, обусловленных действием возмущений от неровностей монорельсового пути.

Список литературы

1. Проектування транспортних систем енергоємних виробництв: [навч. посібник] / В.О. Будішевський, В.О. Гутаревич, О.О. Пуханов та ін.; ред. В.О. Будішевський, А.О. Суліма. – Донецьк: Інфо-Друк, 2008. – 454 с.
2. 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. – 2008. – Вип. 76. – С. 91–96.
3. 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.
4. Ватуля Г.Я. Определение частот и форм свободных колебаний пешеходного моста / Г.Я. Ватуля // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 33. – С. 60-63.
5. Кузнецов Е.В. Метод выбора параметров сталеполимерных анкеров для подвески монорельсовых дорог большой грузоподъемности в выработках / Е.В. Кузнецов // Вестник КузГТУ. – 2005. – №4. – С. 27-28.

Надійшла до редколегії 28.08.2012

В. О. Гутаревич

Донецький національний технічний університет, Донецьк

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТ І ФОРМ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ПІДВІСНОГО ШЛЯХУ ШАХТНОЇ МОНОРЕЙКОВОЇ ДОРОГИ

В роботі розглянуто вплив поздовжньої фіксації монорейки на бокове розгойдування підвісної монорельсової дороги, що відбувається під час її руху. Отримано рівняння вільних коливань механічної системи. Встановлено циклічну частоту та період вільних коливань підвісного рухомого складу.

Ключові слова: підвісна монорейкова дорога, монорейковий шлях, рухомий склад, бокове розгойдування, математична модель.

V. Gutarevych

Donetsk National Technical University, Donetsk

DEFINING THE FREQUENCIES AND MODES OF FREE VIBRATION OF THE SUSPENDED MONORAIL WAY OF THE SHAFT

In this paper we considered the influence of the longitude fixation of the monorail on the winging on the overhead monorail roof that takes place during its movement. The equations of free vibrations of a mechanical system were established.

Keywords: monorail, monorail track, rolling stock, mathematical model.