

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗВИЛИСТОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕЛЕЖЕК ПОДВЕСНОЙ МОНОРЕЛЬСОВОЙ ДОРОГИ

Гутаревич В.О.

RESEARCH OF NOSING MOTION OF SUSPENDED MONORAIL CARRIAGE

Gutarevych V.

Рассмотрено извилистое движение ходовой тележки шахтной подвесной монорельсовой дороги. Установлено, что во время ее движения возникают силы инерции, вызывающие боковое раскачивание подвижного состава и вынуждающие к ограничению скорости движения. Получено решение дифференциального уравнения извилистого движения тележки по подвесному монорельсу.

Ключевые слова: монорельс, тележка, колесо, перемещение, неровности, инерция, колебания.

Постановка проблемы. Во время движения шахтной подвесной монорельсовой дороги по прямолинейным участкам монорельса ходовые тележки описывают сложную волнообразную траекторию. Наряду с прямолинейным движением вдоль монорельса они смещаются поперек продольной оси и поворачиваются вокруг вертикальной. При этом возникают силы инерции и моменты сил инерции, вызывающие боковое раскачивание подвижного состава монорельсовой дороги, что приводит к необходимости ограничивать скорость движения.

– **Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [1] приведены результаты научных исследований по комплексной модернизации ходовых частей грузовых вагонов. Исследования [2-4] посвящены линейным и нелинейным колебаниям подвижного состава. Современное состояние и перспективы развития ходовых частей грузового подвижного состава рассмотрены в работе [5]. Настоящая статья является продолжением указанных исследований.

Цель работы заключается в установлении взаимосвязи между параметрами подвесного монорельсового пути и ходовой тележки во время ее извилистого движения.

Результаты исследований. Рассмотрим тележку (рис.1), имеющую одинаковые ходовые колеса. При этом гироскопические явления, проявляющиеся на скоростях движения более 10

м/с, не учитываем. Исключим также влияние жесткости тележки и монорельса на процесс движения. Следует отметить, что в линейных системах [6-8], описывающих движение тележки, дифференциальные уравнения поступательного движения не зависят от уравнений, описывающих вращение, поэтому продольное движение возможно не учитывать. При этом уравнения для извилистого движения являются дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, равными нулю, во время движения тележки по прямолинейному монорельсу. Общее решение соответствующих однородных уравнений описывает колебательное движение тележки, а частное решение определяет ее основное движение.

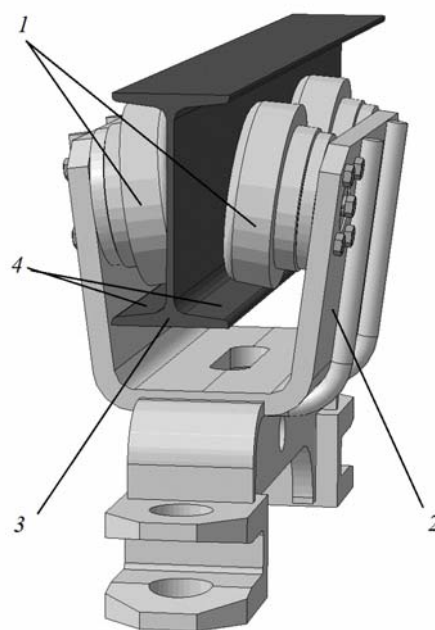


Рис.1. Общий вид расположения тележки на монорельсе:

1 – колесная пара; 2 – корпус тележки; 3 – монорельс; 4 – направляющие поверхности для качения колесной пары

Для двухосной тележки (см. рис.1) характерно 14 степеней свободы, 7 из которых определяют поступательное перемещение, а оставшиеся – боковые перемещения обеих колесных пар и тележки. Для экипажа, имеющего кузов и две двухосные тележки, характерны 34 степени свободы, где 17 координат определяют боковые перемещения колесных пар, тележек и кузова, углы их виляния, а также бокового раскачивания тележек и кузова.

Рассмотрим сначала движение одиночной колесной пары, катящейся по монорельсу (рис. 2). При этом она имеет четыре степени свободы. Две из четырех координат определяют поступательное перемещение, а две другие – боковое перемещение и виляние.

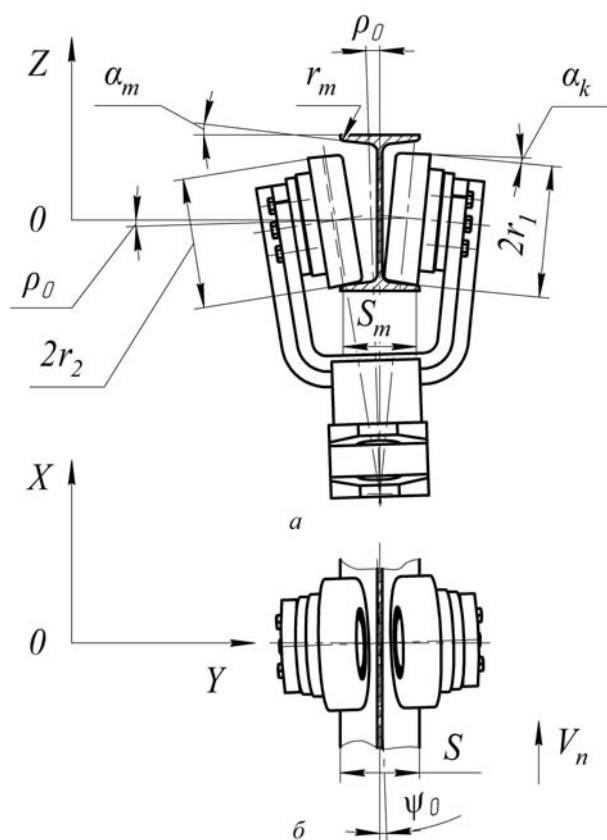


Рис.2. Схема качения колесной пары по монорельсу: а – в плоскости ZOY; б – в плоскости XOY

Колесная пара тележек подвижного состава шахтных подвесных монорельсовых дорог имеет разрезную ось. Во время ее движения по прямолинейному монорельсу без проскальзывания оба колеса вращаются с одинаковой угловой скоростью ω_0 . В случае неравенства радиусов качения по направляющим полкам монорельса левого и правого колес линейные скорости будут отличаться. На основании этого ось колесной пары в горизонтальной плоскости будет перемещаться

поступательно со скоростью V_n , поворачиваясь вокруг вертикальной оси на угол ψ_0 . Найдем взаимосвязь между этими параметрами с использованием [9].

При этом

$$d\psi_0 = \frac{r_1 - r_2}{s_m} \omega_0 dx, \quad (1)$$

где r_1, r_2 – радиусы качения правого и левого колес, соответственно;

s_m – расстояние между окружностями качения с радиусами r_1, r_2 , которое для ходовых тележек, имеющих ширину колес, выступающих за нижнюю полку монорельса и компенсирующих игру колесной колеи (см.рис. 2), равно:

$$s_m = s - 2r_m (1 - \sin(\alpha_m + \alpha_k));$$

s – ширина нижней полки монорельса;

r_m – радиус сопряжения образующих поверхностей качения и боковых граней нижней полки монорельса;

α_m – угол наклона образующих поверхностей качения монорельса относительно горизонтальной плоскости;

α_k – угол наклона образующих поверхностей качения ходовых колес относительно их оси вращения.

Если ходовые колеса устанавливаются относительно монорельса без компенсации игры колесной колеи, что на практике встречается довольно редко, то параметр s_m определяется конструкцией тележки. Это объясняется стремлением обеспечить постоянное удельное давление ходовых колес на поверхности качения монорельса при боковом смещении тележки относительно его нижних полок.

В общем случае средний радиус качения колес определяется как

$$r_c = \frac{1}{2}(r_1 + r_2).$$

Если обозначить $\Delta r = r_1 - r_2$, то выражение (1) будет:

$$\frac{d\psi_0}{dx} = \frac{\Delta r}{s_m r_c} = \frac{1}{R_0}, \quad (2)$$

где R_0 – радиус кривизны траектории перемещения центра колесной пары.

Поскольку при проектировании колесной пары и тележки угол ψ_0 допускается небольшой, то можно считать, что

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{R_0}.$$

Отсюда

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{\Delta r}{s_m r_c} = 0. \quad (3)$$

Для ходовых конических колес, имеющих ось вращения под углом α_m , расположенную в вертикальной плоскости, можно считать $\Delta r = 2\alpha_0 y$, где

$$\alpha_0 = \frac{\sin \alpha_k}{\cos(\alpha_m + \alpha_k)}.$$

Тогда имеем:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{2\alpha_0 y}{s_m r_c} = 0. \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой линейное однородное уравнение с постоянными коэффициентами. Решение этого уравнения имеет вид:

$$y = A \sin \omega_v x + B \cos \omega_v x, \quad (5)$$

где

$$\omega_v = \sqrt{\frac{2\alpha_0}{s_m r_c}}.$$

Учитывая начальные условия, когда при $x = 0$, $y = y_0$ и $\frac{dy}{dz} = 0$, найдем траекторию движения колесной пары по прямолинейному монорельсу:

$$y = y_0 \cos \omega_v x, \quad (6)$$

где y_0 – наибольшее отклонение центра колесной пары от продольной оси монорельса.

Отсюда видно, что траектория движения описывается синусоидальной функцией с длиной волны

$$\lambda_0 = 2\pi / \omega_v.$$

Тогда:

$$\lambda_0 = 2\pi \sqrt{\frac{s_m r_c}{2\alpha_0}}. \quad (7)$$

Как указывалось выше, во время извилистого движения колесной пары по монорельсу возникают силы инерции. При этом их поперечная составляющая равна центробежной силе:

$$H_c = \frac{m_k V_n^2}{R_o} = \frac{2m_k V_n^2}{s_m r_c} \alpha_0 y, \quad (8)$$

где m_k – масса колесной пары.

Следует отметить, что приведенные зависимости (4), (6) и (7) получены для монорельса и колесной пары без отклонений от идеальной формы. Однако на практике часто встречаются различные отклонения геометрических параметров, которые дополнительно влияют на характер движения. Если продольная ось монорельсового пути на прямолинейных участках имеет отклонения в

горизонтальной плоскости δ_y , то уравнение (4) принимает вид:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{2\alpha_0 y}{s_m r_c} = \frac{2\alpha_0 \delta_y}{s_m r_c}. \quad (9)$$

Решение уравнения (9) зависит от собственных колебаний, возникающих во время движения по прямолинейному монорельсу без отклонений от идеальной формы, и вынужденных колебаний, обусловленных действием возмущений в виде отклонений в горизонтальной плоскости. Если отклонения δ_y представить как синусоидальную кривую, то имеем:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{2\alpha_0 y}{s_m r_c} = \frac{2\alpha_0 A_\delta \sin \omega_\delta t}{s_m r_c}, \quad (10)$$

где A_δ – амплитуда неровности монорельса;

ω_δ – частота возмущения.

Отсюда следует, что при определенных соотношениях длины волны извилистого движения колесной пары и длины волны неровности монорельса могут появляться резонансные явления, которые будут сопровождаться резким увеличением амплитуд и снижением плавности хода.

Для тележки, которая имеет две колесные пары, расположенные симметрично относительно середины рамы на расстоянии b_m , длина волны извилистого движения будет:

$$\lambda_{0r} = \lambda_0 \sqrt{1 + \frac{4b_m^2}{s_m^2 \alpha_0}}. \quad (11)$$

Из выражения (11) видно, что повышение b_m приводит к увеличению длины волны извилистого движения тележки по монорельсу, а повышение s_m и α_0 – ее снижению.

При движении колесной пары по круговой кривой монорельса с радиусом R_y на небольшой протяженности пути, то δ_y можно представить как квадратную параболу:

$$\delta_y = \frac{x^2}{2R_y}. \quad (12)$$

Подставив выражение (12) в уравнение (9), получим:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{2\alpha_0 y}{s_m r_c} = \frac{\alpha_0 x^2}{s_m r_c R_y}. \quad (13)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$y = A \sin \omega_v x + B \cos \omega_v x + \frac{x^2}{2R_y} - \frac{s_m r_c}{2R_y \alpha_0}. \quad (14)$$

Отсюда видно, что движение колесной пары по закруглению происходит с синусоидальными отклонениями. Такое движение приводит к появлению сил инерции в горизонтальной плоскости. Кроме того, в месте контакта колесной пары с монорельсом возникают силы трения и проскальзывание колес относительно поверхностей их качения.

Выводы. Полученные зависимости, устанавливающие взаимосвязь между параметрами монорельса и ходовой тележкой во время ее извилистого движения, будут использоваться для обоснованного выбора параметров монорельсовых дорог. В дальнейшем планируется провести теоретические исследования боковых колебаний подвижного состава монорельсовой дороги, обусловленных извилистым движением ходовых тележек и действием возмущений от неровностей пути.

Литература

1. Ушкалов В.Ф. Комплексная модернизация ходовых частей грузовых вагонов / В.Ф. Ушкалов, Т.Ф. Мокрый, И.Ю. Малышева, И.А. Машенко, С.С. Пасичник // Вагонный парк. № 2. 2007. – С.18 - 22.
2. Popp K. Ground Vehicle Dynamics / K. Popp K. W.Schiehlen. –Berlin: Springer, 2010. – 350 p
3. Мельничук В.А. Анализ автоколебаний ходовых частей вагона с помощью видео / В.А. Мельничук, О.М. Савчук, Н.А. Гричаный, И.Ю. Хоменко // Вагонный парк, №9, 2010. – С.10-12.
4. Бороненко Ю.П. Инновации в тележках грузовых вагонов: реальность и перспективы / Ю.П. Бороненко, Е.А. Рудакова, А.М. Орлова // Наука и транспорт, 2009. – С.14-17.
5. Цыган Б.Г. Современное состояние и перспективы развития ходовых частей грузового подвижного состава / Б.Г. Цыган, С.Д. Мокроусов // Вісник СНУ ім. В.Далія, №12(166) ч.1. 2011. – С.267-274.
6. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств / В.Ф. Ушкалов, Л.М. Резников, В.С. Иккол и др.; ред. В.Ф. Ушкалов. –К.: Наук.думка, 1989. – 240с.
7. Шахтарь П.С. Рудничные локомотивы / П.С. Шахтарь. – М.: Недра, 1982. – 296 с.
8. Schiehlen W.O.: *Dynamics of high-speed vehicles* / W.O. Schiehlen Wien. –New York: International Centre for Mechanical Sciences Springer-Verlag, 1982. – 399 p.
9. Вершинский С.В. Динамика вагона / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, В.Д. Хусидов; ред. С.В. Вершинский. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.

References

1. Ushkalov V.F. Kompleksnaja modernizacija hodovyh chastej gruzovyh vagonov / V.F. Ushkalov, T.F. Mokrij, I.Ju. Malysheva, I.A. Mashhenko, S.S. Pasichnik // Vagonnyj park. № 2. 2007. – P. 18 - 22.

2. Popp K. Ground Vehicle Dynamics / K. Popp K. W.Schiehlen. –Berlin: Springer, 2010. – 350 p.

3. Mel'nichuk V.A. Analiz avtokolebanij hodovyh chastej vagona s pomoshh'ju video / V.A. Mel'nichuk, O.M. Savchuk, N.A. Grichanyj, I.Ju. Homenko // Vagonnyj park, №9, 2010. – P.10-12.

4. Boronenko Ju.P. Innovacii v telezhkah gruzovyh vagonov: real'nost' i perspektivy / Ju.P. Boronenko, E.A. Rudakova, A.M. Orlova // Nauka i transport, 2009. – P.14-17.

5. Cygan B.G. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija hodovyh chastej gruzovogo podvzhnogo sostava / B.G. Cygan, S.D. Mokrousov // Visnik SNU im. V.Dalja, №12(166) ch.1. 2011. – P.267-274.

6. Matematicheskoe modelirovanie kolebanij rel'sovyh transportnyh sredstv / V.F. Ushkalov, L.M. Reznikov, V.S. Ikkol i dr.; red. V.F. Ushkalov. –К.: Nauk.dumka, 1989. – 240 p.

7. Shahtar' P.S. Rudnichnye lokomotivy / P.S. Shahtar'. – М.: Nedra, 1982. – 296 p.

8. Schiehlen W.O.: *Dynamics of high-speed vehicles* / W.O.Schiehlen Wien. –New York: International Centre for Mechanical Sciences Springer-Verlag, 1982. – 399 p.

9. Verhinskij S.V. Dinamika vagona / S.V. Verhinskij, V.N. Danilov, V.D. Husidov; red. S.V. Verhinskij. – М.: Транспорт, 1991. – 360 p.

Гутаревич В.О. Дослідження звивистого руху візків підвісної монорейкової дороги

Розглянуто звивистий рух ходового візка шахтної підвісної монорейкової дороги. Встановлено, що під час її руху виникають сили інерції, які викликають бічне розгойдування рухомого складу. Це призводить до необхідності обмежувати швидкість руху. Отримано рішення диференціального рівняння звивистого руху візка підвісної монорейкової дороги.

Ключові слова: монорейка, візок, колесо, переміщення, нерівності, інерція, коливання.

Gutarevych V. Research of nosing motion of suspended monorail carriage

There has been studied the nosing motion of carriage of mine suspended monorail. There has been found out that during its motion there appear inertial forces causing rolling stock side-sway. These oscillations bring to necessity to traverse speed limit. There has been got the solution of differential equation of carriage nosing motion along suspended monorail.

Keywords: monorail, truck, wheel, moving, bumps, inertia, oscillation.

Гутаревич В.О. – к.т.н., доцент кафедри горнозаводського транспорту та логістики, ДонНТУ, г. Донець, Україна, e-mail: gvodonntu@gmail.com.

Рецензент Губачева Л.А., д.т.н., проф.

Статья подана 12.07.2013