

УДК 625.54, 625.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ ГИБКОГО ТЯГОВОГО ОРГАНА КАНАТНОЙ ДОРОГИ

А.В. Самсонов

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского

В статье выполнен динамический анализ одной из конструкций мехатронного привода гибкого тягового органа инновационной транспортной системы «Канатное метро». Динамическая модель состоит из распределенных упругих элементов, соединенных упруго-диссипативными связями.

Ключевые слова: канатное метро, городской транспорт, мехатронный привод, динамика

В современных условиях резкого увеличения в городах количества автотранспортных средств вопросы разработки и внедрения инновационных систем городского пассажирского транспорта являются актуальными. В настоящее время помимо непрерывного совершенствования традиционных видов транспорта развиваются его альтернативные виды, в частности пассажирские канатные дороги [1, 2]. В частности, была разработана концепция развития сети канатного метро в г. Брянске [2, 3]. Конструктивно канатное метро (рис. 1) состоит из концевых и промежуточных станций, соединенных между собой путями из одного тягового и двух несущих канатов. На несущих канатах подвешены пассажирские вагоны. Тележки приводятся в движение тяговым канатом, подключенным к дискретному приводу. Станции оборудованы конвейерами для пассажирских вагонов, а между станциями установлены промежуточные опоры с балансиром. На них опираются стальные канаты, высота закрепления которых варьируется в зависимости от рельефа местности и высоты строений, расположенных под путями движения. Все станции установлены на арочных опорах над проезжими частями улиц с возможностью движения городского автотранспорта и соединены со всеми станциями в каждом направлении двумя независимыми путями из двух несущих и тягового канатов. Специальные конвейеры пересадочных станций оборудованы системой переадресации пассажирских вагонов на другие пути движения [4, 5].



Рис. 1. Вариант интеграции системы «Брянское канатное метро» в существующую дорожную сеть [2]

Новые конструктивные решения [1, 2] требуют разработки методик и моделей моделирования динамики и прочности с целью выбора параметров элементов системы.

Общий вид конструкции мехатронного модуля гибкого тягового (приводного) каната приведен на рис. 2 [4]. Тяговый канат 5 направляющими катками 2 подается на приводное колесо 1. Вращающиеся элементы привода (колесо и катки) соединены между собой шарнирно-сочлененными балансирами 3. Для повышения плавности хода в конструкцию введены упруго-диссипативные элементы (пружины) 4. Приводное колесо через трансмиссию соединено с электродвигателем.

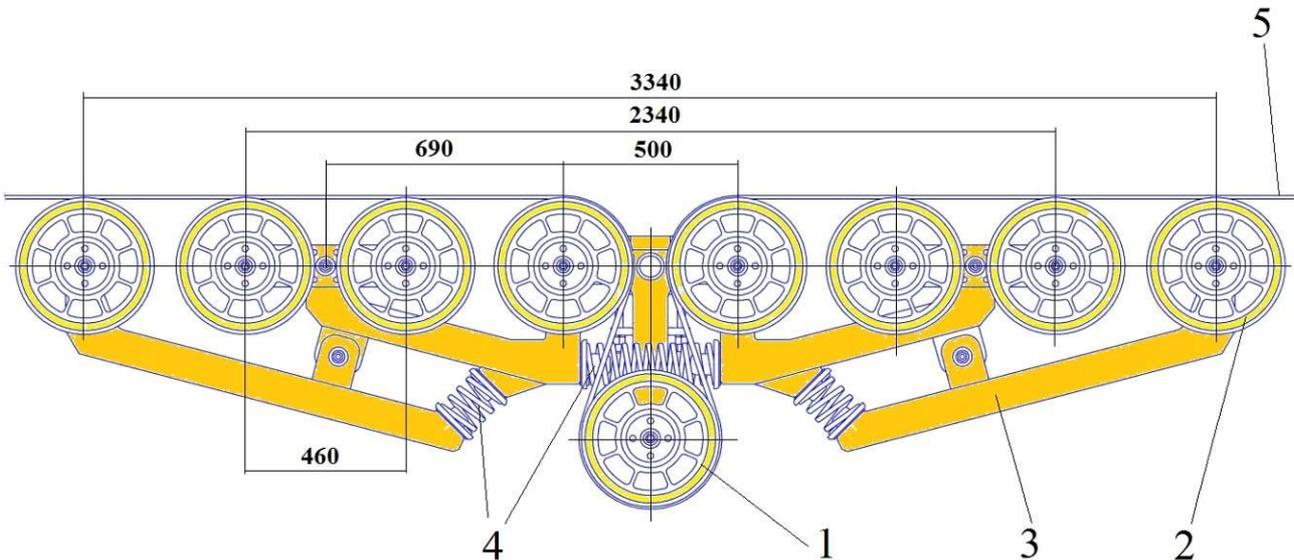


Рис. 2. Конструкция мехатронного модуля гибкого тягового (приводного) каната [4]: 1 – приводное колесо; 2 – направляющий каток; 3 – балансир; 4 – демпфер; 5 – тяговый канат

Расчетная схема исследования колебаний элементов конструкции в стационарном режиме работы приведена на рис. 3. Параметры расчетной схемы: m_i – приведенные к центрам катков массы катков и балансиров, c_i – жесткости элементов, b_i – вязкости элементов, a_i – линейные размеры.

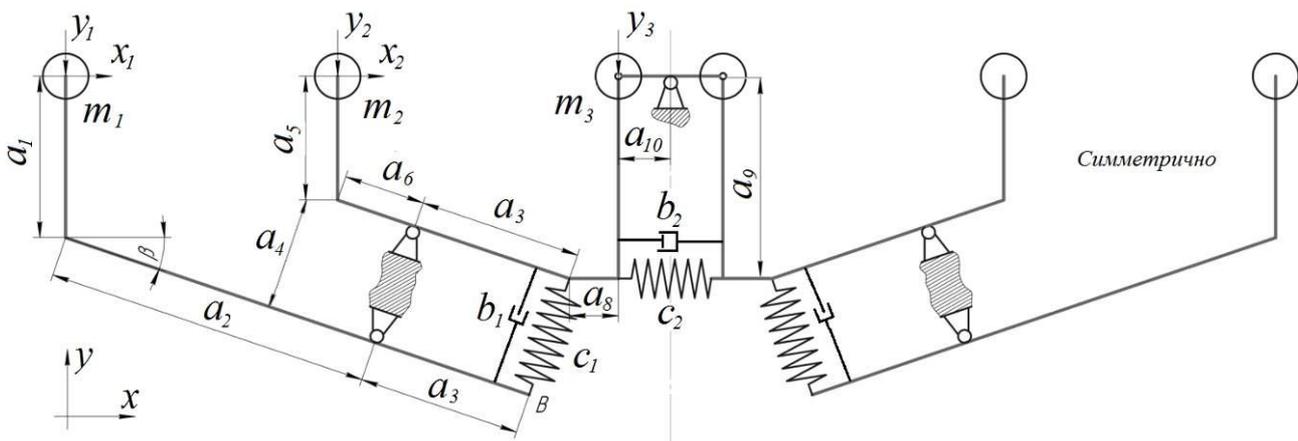


Рис. 3. Расчетная схема мехатронного модуля гибкого тягового (приводного) каната

Дифференциальные уравнения движения исследуемой системы сформируем в следующем виде [6, 7]:

$$\{q\} = [\delta] \cdot ([M]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\}),$$

где $[\delta]$ – матрица податливости, $[M]$ – матрица масс, $[B]$ – матрица вязкости [6], $\{\dot{q}\}$ – вектор скоростей, $\{\ddot{q}\}$ – вектор ускорений.

Компоненты матрицы масс определяются из выражения

$$m_{ij} = \frac{\partial^2 T}{\partial \dot{q}_i \partial \dot{q}_j},$$

где T – кинетическая энергия системы (сумма кинетических энергий отдельных масс).

Определим компоненты матрицы податливости $[\delta]$. В силу симметричности объекта исследования рассмотрим только половину системы. При определении податливости учитывается податливость пружин и стержней.

Первый диагональный элемент матрицы

$$\delta_{11} = \delta_{11c} + \delta_{11n},$$

где δ_{11c} – компонента, связанная с податливостью стержней, δ_{11n} – компонента, связанная с податливостью пружин.

Рассмотрим алгоритм нахождения компонентов матрицы податливости на примере податливости δ_{11} . Для определения составляющей δ_{11c} приложим в районе массы m_1 по направлению координаты y_1 единичную силу. Затем находим силы реакций опор, строим эпюру действующих на стержни изгибающих моментов, перемножаем эпюру саму на себя для нахождения податливости.

В исследуемой конструкции (рис. 2) поперечные сечения всех балансиров одинаковы. Значит, жесткости всех стержней расчетной схемы (рис. 3) равны. В этом случае

$$\delta_{11c} = \frac{1}{EJ} \left[\left(\frac{1}{3} a_2^3 + \frac{1}{3} a_2^2 a_3 + \frac{1}{3} a_3 (a_2 + a_3)^2 \right) \cos^2 \beta + \frac{a_8}{6} (2(a_2 + a_3) \cos \beta ((a_2 + a_3) \cos \beta + a_8)) + \right. \\ \left. + 2 \{ (a_2 + a_3) \cos \beta \}^2 + \left(1 + \frac{a_9}{6} \right) \cdot \{ (a_2 + a_3) \cos \beta + a_8 \}^2 + \frac{a_{10}^3}{6} \right],$$

где E – модуль упругости материала, J – момент инерции поперечного сечения стержня.

Определим вторую компоненту податливости δ_{11n} из соотношений, связывающих поворот стержневой системы и деформации пружин:

$$\delta_{11n} = \frac{1}{c_1} \left(\frac{a_2}{a_3} \right)^2 \cos \left[\beta - \arcsin \left(\frac{a_2}{2a_3^2 c_1} \cos \beta \right) \right] + \frac{a_1 a_2}{a_3^2 c_1} \cos \beta \sin \left(\arcsin \left[\frac{a_2}{2a_3^2 c_1} \cos \beta \right] \right) + \\ + \frac{L_0}{2a_9 c_2} \cdot \frac{(a_2 + a_3) \cos \beta + a_8}{a_2} \cdot \cos \left(\arcsin \left[\frac{(a_2 + a_3) \cos \beta + a_8}{2a_9^2 c_2} \right] \right),$$

L_0 – расстояние между осями крайних направляющих катков.

Проделав аналогичные вычисления для других степеней свободы, получаем все компоненты матрицы податливости.

В расчетах приняты следующие параметры динамической модели исследуемой конструкции мехатронного модуля: $a_1 = 0,2$ м; $a_2 = 0,8$ м; $a_3 = 0,4$ м; $a_4 = 0,2$ м; $a_5 = 0,15$ м; $a_6 = 0,225$ м; $a_8 = 0,1$ м; $a_9 = 0,465$ м; $a_{10} = 0,4$ м; $L_0 = 3,34$ м; $\beta = 30^\circ$; $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Н/м; $J = 7 \cdot 10^{-7}$ м⁴; $c_1 = 800$ кН/м; $c_2 = 9000$ кН/м; масса катка $m_0 = 10$ кг; материал балансиров (стержней) – сталь.

Для определения собственных частот без учета сил трения необходимо решить матричное уравнение

$$\{k^2\} = [M]^{-1} [\delta]^{-1}.$$

Собственные частоты исследуемой системы: 1,23; 12,36; 52,2; 257,0; 830,5 Гц.

На рис. 4 показан график колебания груза m_1 вдоль координаты y_1 в случае воздействия на каждый каток внешнего гармонического возмущения

$$P = \frac{T}{N_k} \cos 5t,$$

где T – натяжение тягового каната, N_k – количество катков.

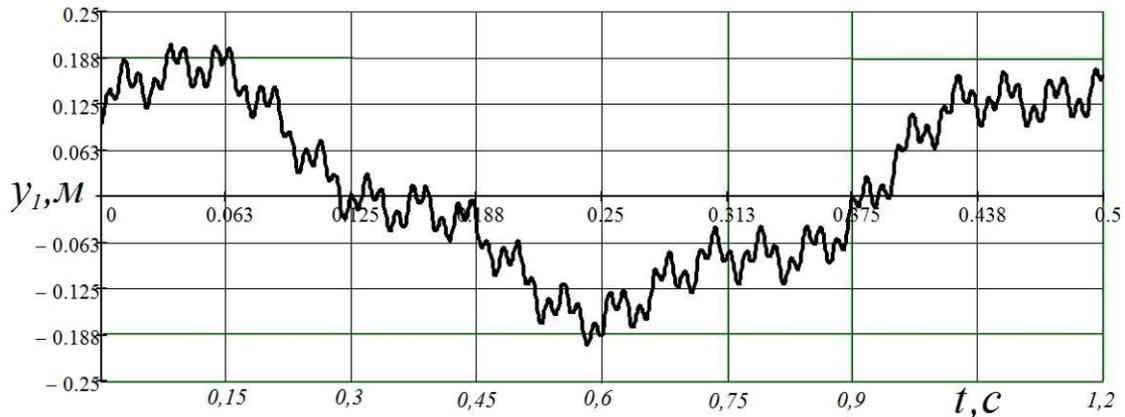


Рис. 4. Вынужденные колебания груза m_1 вдоль координаты y_1

В данной статье приведены первые результаты расчетов нового вида транспортного механизма – пассажирской канатной дороги с распределенным приводом. В дальнейшем планируется создание более детальных комплексных моделей системы в целом. Так как построение матрицы податливости требует большого количества трудоемких вычислений, то целесообразно использовать более общие методы построения уравнений движения. Уточненные динамические модели будут использоваться в ходе оптимизации линий канатного метро [8-10].

Список литературы

1. Короткий, А.А. О перспективах применения канатного транспорта / А.А. Короткий, В.Б. Маслов [и др.] // Безопасность труда в промышленности. - 2005. - №6. - С.30-34.
2. Лагерев, А.В. Концепция инновационной системы городского транспорта «Канатное метро города Брянска» / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев, А.А. Короткий, А.В. Панфилов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2012. - №3. - С. 12-15.
3. Лагерев, А.В. Брянское канатное метро / А.В. Лагерев, А.А. Короткий, А.В. Панфилов, И.А. Лагерев // Материалы научной конференции Совета МНТО / под ред. И.А. Лагерев. - Брянск: БГТУ, 2012. - С. 36-39.
4. Городская канатная дорога: пат. 2412840 Рос. Федерация: МПК⁷ В61В7/00 / авторы и заявители Короткий Д.А., Маслов В.Б., Маслов Д.В., Кирсанов М.В., Панфилов А.В.; патентообладатель ООО «ИКЦ «Мысль». - № 2010106643/11; заявл. 24.02.10; опубл. 27.02.11, Бюл. №6.
5. Транспортная система (канатное метро): пат. №2506182. Рос. Федерация: МПК⁷ В61В7/00 / авторы А.А. Короткий, А.В. Лагерев, Б.И. Месхи, В.М. Приходько, Г.В. Кустарев, В.Б.Маслов, Д.А. Короткий, М.В. Кирсанов, А.В. Панфилов, И.А. Лагерев; заявитель ООО ИКЦ «Мысль»; патентообладатель А.А. Короткий. - №2012121358/11; заявл. 23.05.12; опубл. 10.02.2014, Бюл. №4.
6. Лагерев, И.А. Динамика трехзвенных гидравлических кранов-манипуляторов: монография / И.А. Лагерев, А.В. Лагерев.- Брянск: БГТУ, 2012. - 196 с.
7. Лагерев, И.А. Динамический анализ трехзвенного гидравлического крана-манипулятора / И.А. Лагерев, А.В. Лагерев // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2011. - №3. - С. 9-16.
8. Лагерев, А.В. Оптимальное проектирование линии канатного метро / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного университета. - 2015. - №2. - С. 406-415.

9. Лагерев, А.В. Оптимальное проектирование линий канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. - 2015. – Т.1. - №1. - С. 57-65.

10. Лагерев, А.В. Оптимизация шага установки промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного университета. - 2014. - №4. - С. 22-31.

Сведения об авторах

Самсонов Анатолий Владимирович – младший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», *inno-bgu@yandex.ru*.

CABLE RAILWAY MECHATRONIC DRIVE DYNAMICS SIMULATION

A.V. Samsonov

Dynamic analysis of one of the designs of mechatronic drive with flexible traction body innovative transport system "Kanatnoe metro" is under consideration in this article. The dynamic model consists of distributed elastic elements connected by elastic-dissipative links.

Keywords: cable railway, metro, urban transport, mechatronic drive, dynamics.

References

1. Korotkiy A.A., V.B. Maslov. O perspektivakh primeneniya kanatnogo transporta, *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2005, No.6, pp. 30-34.

2. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Korotkiy A.A., Panfilov A.V. Innovation transport system "Bryansk rope metro", *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No.3, pp. 12-15.

3. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Korotkiy A.A., Panfilov A.V. Bryansk rope metro, *Materialy nauchnoy konferentsii Soveta MNTO*, 2012, pp. 36-39.

4. Patent RU 2412840. *Gorodskaya kanatnaya doroga* [Urban cable way]. Korotkiy D.A., Maslov V.B., Kirsanov M.V., Panfilov A.V. Declared 24.02.2010. Published 27.02.2011. Bulletin No. 6.

5. Patent RU 2506182. *Transportnaya sistema «Kanatnoe metro»* [Transport system «Rope metro»]. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meshi B.I., Prikhodko V.M., Kustarev G.V., Maslov V.B., Korotkiy D.A., Kirsanov M.V., Panfilov A.V., Lagerev I.A. Declared 23.05.2012. Published 10.02.2014. Bulletin No. 4.

6. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Dinamika trkhzvennykh gidravlicheskykh kranov-manipulatorov* [Hydraulic articulating cranes dynamics]. Bryansk, BGTU, 2012. 196 p.

7. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Dynamic analysis of a hydraulic three-tier crane-manipulator, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, No.3, pp. 9-16.

8. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of the cable car line, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 2, pp. 406-415.

9. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of cable subway lines in a highly urbanized city environment, *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI*, 2015, Vol. 1, No. 2, pp. 57-65.

10. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Cable transport system "Kanatnoe metro" towers distance optimisation, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, No. 4, pp. 22-31.

Authors' information

Anatoly V. Samsonov – Junior researcher at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, *inno-bgu@yandex.ru*.