

Динамические свойства тележки вагона метрополитена



Алексей ВАХРОМЕЕВ

Aleksey V. VAKHROMEYEV

Dynamic Properties of Metro Car's Bogie

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 113)

Статья посвящена разработке расчетной конечно-элементной модели немоторной тележки вагона метрополитена, которая не противоречит реальной конструкции. Рассматривается необходимость применения метода конечных элементов, поскольку он учитывает упругие, инерционные и диссипативные свойства динамических систем. С помощью заявленной модели выполняется расчет нормальных форм колебаний и исследуется поведение тележки как динамической системы при вынужденных колебаниях.

Ключевые слова: метрополитен, вагон, модель немоторной тележки, метод конечных элементов, нормальные формы колебаний, амплитудно-частотные характеристики, динамическая система.

Вахромеев Алексей Викторович – аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Для решения динамических задач следует иметь модель исследуемой динамической системы и определить динамические нагрузки, взаимодействующие с ней [1].

В качестве динамических возмущений для тележки вагона метрополитена будут приняты воздействия, передающиеся от рельсового пути на раму тележки [2].

Разработка расчетной математической модели рамы тележки состоит из двух основных этапов: построение геометрической трехмерной модели с использованием рабочих чертежей деталей тележки и создание конечно-элементной модели на базе геометрической.

На этапе разработки геометрической модели следует создавать подробную модель, поскольку для расчетов рам тележек методом конечных элементов рекомендуется применять уточненные расчетные схемы.

При разработке геометрической модели рамы необходимо учитывать все особенности ее конструкции, которые могут влиять на параметры жесткости: форма сечений балок, толщина листов, внутренние диафрагмы, внешние ребра и накладки. Также к жесткости рамы имеют отношение внеш-

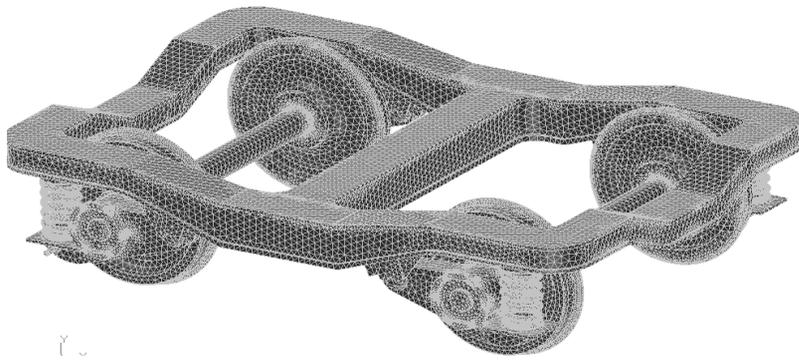


Рис. 1. Расчетная конечно-элементная модель тележки вагона метрополитена.

ние элементы, расположенные на ней, в частности — кронштейны буксового подвешивания, редукторов, упоров центрального подвешивания, поэтому их тоже надо принимать во внимание при создании трехмерной геометрической модели.

Математическая модель рамы тележки ввиду большого количества дифференциальных уравнений формируется с помощью компьютерной программы MSC.Patran. Все расчеты производятся методом конечных элементов — он ориентирован на решение различных задач с учетом распределенных упругих, инерционных и диссипативных характеристик. Математическая суть моделируемой системы аппроксимируется конечными элементами, которые позволяют учесть сложную форму конструкции. При этом можно не выполнять относительно малые по радиусу скругления и фаски, ибо они могут значительно увеличить время расчета.

В основе метода конечных элементов лежит дискретизация объекта с целью решения уравнений механики сплошной среды в предположении, что возникающие соотношения выполняются в пределах каждой из элементарных областей. Эти области называются конечными элементами. В пределах такого элемента назначаются свойства ограничиваемого им участка объекта. Параметры находятся в узлах элемента, а затем вводятся интерполирующие функции, посредством которых соответствующие значения можно вычислить в любой точке внутри элемента и на его границе. Задача математического описания сводится к тому, чтобы связать действующие в узлах факторы. В механике сплош-

ной среды это, как правило, перемещения и усилия [3–7].

Рассматриваемая геометрическая модель тележки вагона метрополитена состоит из рамы, которая опирается на буксы посредством витых цилиндрических пружин, и колесных пар [8].

Для создания расчетной модели был использован пакет «Patran-Nastran», где на геометрическую модель наложена конечно-элементная сетка в виде десятиузловых пирамидальных элементов, так называемых Tet-10 элементов [9]. Чем больше конечное число таких элементов, тем точнее результат расчетов. Разбитая на конечные элементы расчетная конструкция изображена на рис. 1. Жесткость пружин подобрана согласно паспортным данным [10].

На первом этапе работы с моделью производился расчет нормальных форм колебаний методом конечных элементов (МКЭ), который показал, что собственные частоты рамы тележки лежат в области 30–80 Гц.

На втором этапе предусмотрено исследование поведения тележки как динамической системы при вынужденных колебаниях. Динамические свойства модели необходимо знать, чтобы не допустить или устранить нежелательные колебания. Граничные условия заданы в виде контакта колес с рельсами, а в качестве возмущения принята единичная сила, приложенная к колесу, что соответствует возмущению при наезде колеса на неровность пути. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) были вычислены на центральной балке, на переходе продольной балки в концевую, вблизи перехода центральной



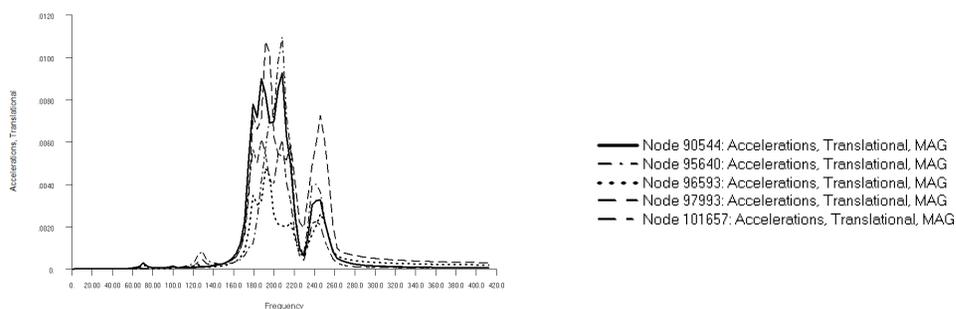


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики рамы тележки вагона метрополитена. Node 90544 – узел на вогнутой части концевой балки; Node 95640 – узел на переходе продольной балки в концевую; Node 96593 – узел в месте соединения центральной балки с продольной; Node 97993 – узел на центральной балке; Node 101657 – узел на скосе концевой балки.

балки с концевой, на вогнутых частях и скосах концевых балок (рис. 2) [11, 12].

Коэффициент конструкционного демпфирования был принят равным 0,02, что соответствует значению относительного коэффициента демпфирования [13, 14].

Наибольший отклик на возмущение от пути возникает на центральной балке, на рис. 2 видны острые резонансные пики на частотах 200, 210 и 240 Гц.

На амплитудно-частотной характеристике проявляется третья собственная частота колебаний рамы тележки 68 Гц (ее иллюстрируют колебания концевых балок рамы), а также вторая гармоника – 130 Гц, при этом амплитуда колебаний на этой частоте в два раза больше, чем на 68 Гц.

Резонансные пики в области более высоких частот – 180, 210, 210, 240 Гц – гармонически связаны с первой и второй частотой нормальных форм колебаний – 30 и 60 Гц. На этих частотах проявляются изгибные колебания рамы тележки совместно с элементами, находящимися на ней [15].

Таким образом, методом отклика динамической системы тележки вагона метрополитена на стационарное случайное возмущение определены частоты, на которых наиболее вероятно возникновение резонансных колебаний.

Координаты автора: **Вахромеев А. В.** – alexey.vakhromeev@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 22.12.2014, актуализирована 19.11.2015, принята к публикации 20.11.2015.

Статья подготовлена на основе материалов, представленных автором на Международной научно-практической конференции «Конструкция, динамика и прочность подвижного состава», посвященной 75-летию со дня рождения В. Д. Хусидова (МИИТ, 20-21 марта 2014 года).

ЛИТЕРАТУРА

1. Карюкин А. В. Динамика поддресорных тяговых приводов перспективных электропоездов / дис... канд. техн. наук. – М.: МИИТ, 2005. – 230 с.
2. Камаев А. А. Динамика подвижного состава железных дорог. – Тула: Тульский политех. ин-т, 1976. – 150 с.
3. Нормы для расчета оценки прочности несущих элементов и динамических качеств экипажной части моторвагонного подвижного состава железных дорог МПС РФ колеи 1520. – М., ВНИИЖТ, 1997. – 146 с.
4. Blakely Ken. MSC/Nastran Basic Dynamic Analysis. User's Guide. Version 68.
5. MD Nastran R2.1. Quick Reference Guide, 2666 p.
6. Patran 2008 r1. User's Guide, 2009. – 210 p.
7. Sitton, G. MSC/Nastran Basic Dynamic User's Guide, V69 / G. Sitton – The MacNeal – Schwender Corporation, 1997.
8. ТУ 3183–030–05804803–2002. Вагон метрополитена модели 81–740 Технические условия. СКБ Метро, 2002. – 51 с.
9. MSC.Nastran 2004. 1008 с.
10. Белов Д. В., Лобанов А. Н., Сорокин А. Л., Усачев Г. С., Широков Г. В. Механическое оборудование вагонов 81–740.1, 81–741.1 «Русич» / Под ред. В.Н. Гаранина. – М.: Московский метрополитен. Учебно-производственный центр, 2008. – 94 с.
11. Динамический анализ. Базовый курс. Руководство пользователя. MSC/NASTRAN Версия 69. Пер. с англ. // Центр высоких технологий в машиностроении, 2007. – 313 с.
12. MSC.Nastran. Basic Dynamic Analysis User's Guide. – MSC Software Corporation. U.S.A. 2004. – 546 с.
13. Пановко Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. – М.: ГИФМЛ, 1960. – 186 с.
14. Писаренко Г. С. Колебания механических систем с учетом несовершенной упругости материала. – Киев: Наукова думка, 1970. – 380 с.
15. Механическая часть тягового подвижного состава: Учебник / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак и др.; под ред. И. В. Бирюкова. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с. ●

DYNAMIC PROPERTIES OF METRO CAR'S BOGIE

Vakhromeev, Aleksey V., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

ABSTRACT

The article is devoted to development of computational finite element model of trailer bogie of a metro car, which is not contrary to the actual design. The necessity of finite element method application

Keywords: metro, car, trailer bogie model, finite element method, normal vibration modes, frequency response, dynamic system.

Background. To solve dynamic tasks it is necessary to have a model of investigated dynamic system and to determine dynamic loads that interact with it [1].

As dynamic perturbation for metro car's bogie impacts will be taken which are transmitted from a track to a bogie frame [2].

The development of computational mathematical model of the bogie frame consists of two main phases: construction of three-dimensional geometric model using working drawings of bogie parts and creation of finite element model based on the geometric one.

Objective. The objective of the author is to consider dynamic properties of bogies of metro cars.

Methods. The author uses general scientific methods, simulation, comparative analysis, evaluation approach.

Results. During the design phase of a geometric model it is necessary to create a detailed model as for calculation of bogie frames using finite element method refined design schemes are recommended for use.

When designing a geometric model of the frame it is necessary to take into account all peculiarities of its design, which may affect stiffness parameters: beam cross-section shape, thickness of sheets, inner aperture, external edges and covering plates. External components on frame relate to frame rigidity, in particular axlebox suspension brackets, gearboxes, central suspension thrusts, so they should be taken into account in the three-dimensional geometric model.

Mathematical model of the bogie frame due to the large number of differential equations is generated by a computer program MSC.Patran. All calculations are made using finite element method – calculation method that focuses on the solution of various tasks, taking into account distribution of elastic, inertial and dissipative characteristics. The mathematical essence of the modeled system is approximated by finite elements that allow to take into account the complex shape of the design. At the same time, it is possible not to make relatively small radius of rounding and chamfer, because they can significantly increase calculation time.

The finite element method is based on discretization of an object for the purpose of solving the equations of continuum mechanics under the assumption that resulting ratios are performed within each of the elementary areas. These areas are called finite elements. Within this element properties are assigned of the object section limited by it. Parameters are located in nodes of the elements, and then interpolating functions are introduced, whereby the respective values can be calculated at any point within the cell and on its boundary. The task of mathematical description is to connect factors, acting in the nodes. In

is considered, as it takes into account elastic, inertial and dissipative properties of dynamical systems. With the stated model normal vibration modes are calculated and bogie behavior is studied as a dynamic system with forced vibrations.

continuum mechanics they are, as a rule, displacement and force [3–7].

Considered geometric model of the metro car's bogie consists of a frame, which rests on the axle box through twisted coil springs and wheel sets [8].

To create a calculation model package «Patran-Nastran» was used, where on the geometric model was imposed finite element grid as ten-node pyramidal elements, the so-called Tet-10 elements [9]. The greater is the number of finite elements, the more accurate is the calculation result. Broken into finite elements the calculated structure is shown in Pic. 1. The spring stiffness is chosen according to the passport data [10].

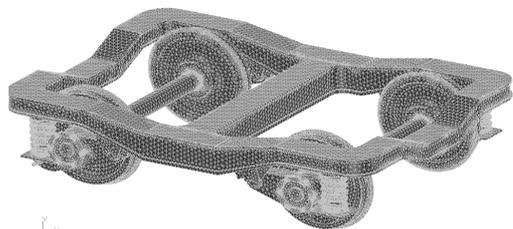
At the first stage of the work model calculation of normal modes of vibration was conducted using finite element method (FEM), which showed that natural frequencies of the bogie frame lie in the range of 30–80 Hz.

The second stage provided the study of the behavior of the bogie as a dynamic system with forced vibrations. It is necessary to know dynamic properties of the model in order to prevent or to eliminate unwanted vibrations. The boundary conditions are given in the form of contact of wheels with rails, and as disturbance is taken the unit force applied to the wheel, which corresponds to the disturbance at wheel running on an uneven track. The amplitude-frequency characteristic (AFC) was calculated on the central beam at the transition of the longitudinal beam into the end one, near the transition of the central beam from the end one, on concave parts and bevel angles of end beams (Pic. 2) [11, 12].

Structural damping ratio was set at 0,02, which corresponds to the relative damping coefficient [13, 14].

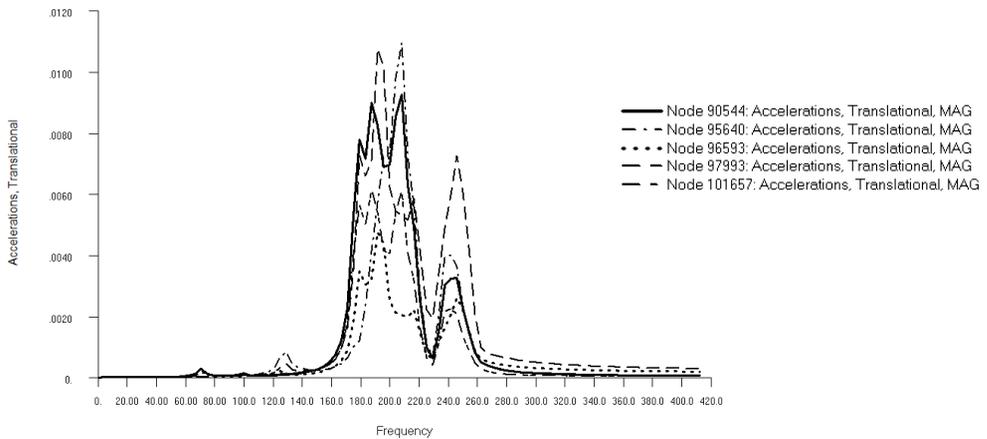
The greatest response to the disturbance from the track occurs on the central beam, in Pic. 2 there are sharp resonance peaks at the frequencies of 200, 210 and 240 Hz.

The amplitude-frequency characteristic shows the third natural frequency of the bogie frame 68 Hz (it is illustrated by fluctuations of end beams of the



Pic. 1. Design finite element model of metro car's bogie.





Pic. 2. The amplitude-frequency characteristics of the metro car's bogie frame. 90544 Node is node on the concave part of the end beam; 95640 Node is node at transition of the longitudinal beam into the end one; Node 96593 is node at connection of the longitudinal beam with the central one; 97993 Node is node on the central beam; Node 101657 is node at the bevel angle of the end beam.

frame), and the second harmonic – 130 Hz, the amplitude of oscillation at this frequency is twice higher than 68 Hz.

The resonance peaks at higher frequencies – 180, 210, 210, 240 Hz – are harmonically related to the first and second frequencies of normal modes of vibration – 30 and 60 Hz. At these frequencies appear bending vibrations of bogie frame together with elements on it [15].

Conclusion. Thus, the method of response of the dynamic system of metro car's bogie to stationary random perturbation permits to identify the frequencies which most likely lead to resonance vibrations.

REFERENCES

1. Karyukin, A. V. Dynamics of suspended traction drives of promising electric trains [Dinamika podressorenykh tjavovykh privodov perspektivnykh elektropoezdov]. Ph.D. (Eng.) thesis. Moscow, MIIT publ., 2005, 230 p.
2. Kamaev, A. A. Dynamics of railway rolling stock [Dinamika podvizhnogo sostava zheleznih dorog]. Tula, Tula Polytechnic Institute, 1976, 150 p.
3. Rules for calculation of evaluation of stiffness of bearing elements and dynamic properties of vehicle part of multiple unit of railway gauge 1520 of Ministry of Railways of the Russian Federation [Normy dlja rascheta ocenki prochnosti nesushhijh elementov i dinamicheskijh kachestv ekipazhnoj chasti motorvagonnogo podvizhnogo sostava zheleznih dorog MPS RF kolei 1520]. Moscow, VNIIZhT publ., 1997, 146 p.
4. Blakely Ken. MSC/Nastran Basic Dynamic Analysis. User's Guide. Version 68.
5. MD Nastran R2.1. Quick Reference Guide, 2666 p.
6. Patran 2008 r1. User's Guide, 2009, 210 p.

7. Sitton, G. MSC/Nastran Basic Dynamic User's Guide, V69/ G. Sitton- The MacNeal – Schwender Corporation, 1997.

8. TU3183–030–05804803–2002. Metro car model 81–740. Specifications [TU3183–030–05804803–2002. Vagon metropolitana modeli 81–740 Tehnicheskie uslovija]. SKB Metro, 2002, 51 p.

9. MSC.Nastran 2004. 1008 p.

10. Belov, D. V., Lobanov, A. N., Sorokin, A. L., Usachev, G. S., Shirokov, G. V. Mechanical equipment of cars 81–740.1, 81–741.1 «Rusich» [Mehaničeskoe oborudovanie vagonov 81–740.1, 81–741.1 «Rusich»]. Ed. by head of TPC Garantin, V. N. Moscow, Moscow Metro. Training and production centre, 2008, 94 p.

11. Dynamic analysis. Basic Course. User guide. MSC / NASTRAN version 69. [Dinamicheskij analiz. Bazovyj kurs. Rukovodstvo pol'zovatelja. MSC/ NASTRAN Versija 69. Translated from English]. Ed. by D.Sc. (Eng.) V. V. Makeev. Center for High Technology in Mechanical Engineering, 2007, 313 p.

12. MSC.Nastran. Basic Dynamic Analysis User's Guide. – MSC.Software Corporation. U.S.A. 2004, 546 p.

13. Panovko, Ya. G. Internal friction at oscillations of elastic systems [Vnutrenne trenie pri kolebanijah uprugih sistem]. Moscow, GIFML, 1960, 186 p.

14. Pisarenko, G. S. Vibrations of mechanical systems taking into account imperfect elasticity of material [Kolebanija mehanicheskijh sistem s uchetom nesovershennoj uprugosti materiala]. Kiev, Naukova dumka publ., 1970, 380 p.

15. Biryukov, I. V., Savoskin, A. N., Burchak, G. P. et al. Mechanical part of traction rolling stock: textbook [Mehaničeskaja čast' tjavovogo podvizhnogo sostava: učebnik]. Ed. by I. V. Biryukov. Moscow, Transport publ., 1992, 440 p. ●

Information about the author:

Vakhromeev, Aleksey V. – Ph.D. student at the department of Cars and cars economy of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, alexey.vakhromeev@gmail.com.

Article received 22.12.2014, revised 19.11.2015, accepted 20.11.2015.

The article is based on the papers, presented by the author at the International scientific and practical conference «Rolling stock's Design, Dynamics and Strength», dedicated to the 75th anniversary of V. D. Husidov, held in MIIT University (March, 20–21, 2014).



**НАЛОГОВЫЙ
ДОХОД** **116**

*Транспорт помогает
региональным бюджетам.*

**МАЛОЕ
КОЛЬЦО** **124**

*Реконструкция стоит денег.
Нельзя просчитаться.*

ЛОГИСТИКА **136**

*Материальные потоки при
экспорте вьетнамских
товаров.*

**АРХИТЕКТУРА
СИСТЕМ** **144**

*Построение семейства
концептуальных моделей.*



РИСКИ **152**

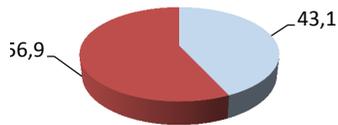
*Лучше предусмотреть, чем
недосмотреть.*

**TAX INCOME
V. INCOME TAX** **116**

*Transport helps regional
budgets.*

**SMALL CIRCLE
LINE OF MOSCOW
RAILWAY** **124**

*Reconstruction is worth money.
There is no place for errors.*



LOGISTICS **136**

*Material flows of Vietnamese
goods exportation.*

**SYSTEM
ARCHITECTURE** **144**

*Building a family of conceptual
models.*

RISKS **152**

*It is better to foresee, than to
overlook.*

