

СЕКЦИЯ 7. ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.4.015:004.94

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. В. Ворожун

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет
транспорта», г. Гомель*

Проведено исследование торможения пассажирского поезда на прямом и криволинейном в профиле участке пути с разностью уклонов до 6 ‰, выполненное на основе аналитического расчета и компьютерного эксперимента в инженерном пакете MSC.ADAMS. Разработаны модели, учитывающие силы сопротивления движению, тормозные силы, силу от уклона пути и усилия, возникающие в межвагонных соединениях. Выполнена оценка сопоставимости результатов расчетов, проведенных двумя методами.

Ключевые слова: подвижной состав, тормозной путь, переменный профиль пути, математическая модель, компьютерный эксперимент.

ANALYSIS OF TRAIN DYNAMICS ON THE BASE OF THE MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

A. U. Varazhun

Belarusian State University of Transport, Gomel

The paper considers the investigation of passenger train braking at straight and curved in plane track with the slope difference up to 6 ‰ based on the analytical calculation and computer simulation in the engineering software package. There are created the models taking into account resistance forces, braking forces, force from the track inclination and forces arising in the intercar connections. The assessment of comparability of the obtained by two methods results is performed.

Keywords: rolling stock, distance of braking, variable track profile, mathematical model, computer simulation.

На динамические параметры подвижного состава существенное влияние оказывает профиль пути. Как правило, при математическом моделировании поезд принимается за материальную точку, а длина его тормозного пути определяется по интервалам скорости или интервалам времени [1, 2]. Некоторые авторы, например [3], рассматривают поезд как систему твердых тел, соединенных в продольном направлении упругими связями. Однако проведение расчетов таким методом для длинно-составного поезда ограничены производительностью вычислительной техники. Кроме того, составление математической модели для такого поезда может занять длительное время.

Поэтому целью представленной работы является изучение возможности проведения аналогичных расчетов на основе компьютерного моделирования. Задачи, обусловленные целью работы, включают разработку математической и компьютерной модели состава поезда, имеющего одинаковые характеристики, и оценка адекватности созданной компьютерной модели на основе сравнения результатов расчетов, полученных двумя способами.

Расчетные схемы подвижного состава, включающего локомотив и вагоны и представляющего собой сложную механическую систему со многими степенями свободы, представлены на рис. 1.

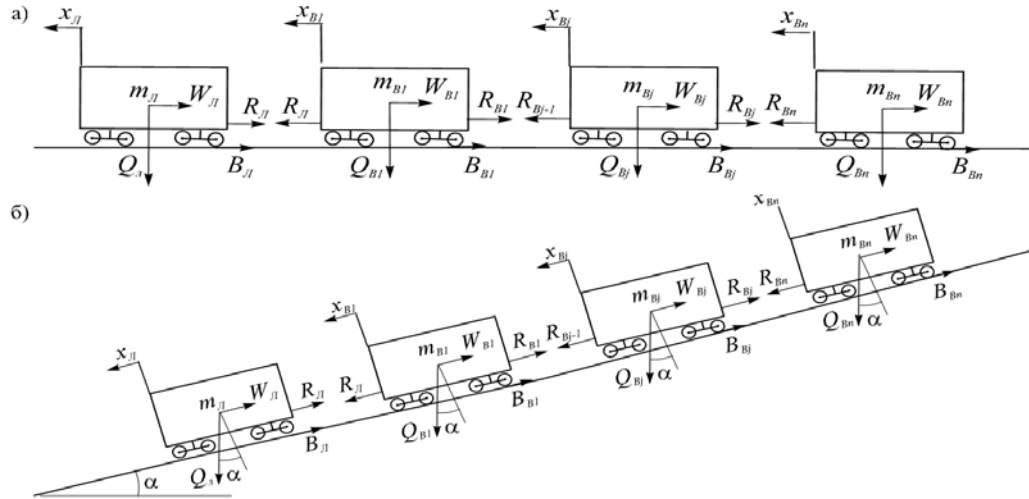


Рис. 1. Расчетная схема движения поезда по прямолинейному (а) и криволинейному (б) в профиле пути

Математическая модель движения локомотива и n вагонов поезда вдоль пути с нулевым уклоном (рис. 1, а) может быть записана на основе системы дифференциальных уравнений (1), получены с применением принципа Даламбера:

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{л}} \ddot{x}_{\text{л}} + R_{\text{л}} + B_{\text{л}} + W_{\text{л}} &= 0; \\ m_{\text{в}_1} \ddot{x}_{\text{в}_1} - R_{\text{л}} + R_{\text{в}_1} + B_{\text{в}_1} + W_{\text{в}_1} &= 0; \\ \dots \dots \dots \\ m_{\text{в}_j} \ddot{x}_{\text{в}_j} + R_{\text{в}_j} - R_{\text{в}_{j-1}} + B_{\text{в}_j} + W_{\text{в}_j} &= 0; \\ \dots \dots \dots \\ m_{\text{в}_n} \ddot{x}_{\text{в}_n} - R_{\text{в}_n} + B_{\text{в}_n} + W_{\text{в}_n} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Математическая модель движения локомотива и n вагонов поезда вдоль пути с ненулевым уклоном, в соответствии с рис. 1, б, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{л}} \ddot{x}_{\text{л}} + R_{\text{л}} + B_{\text{л}} + W_{\text{л}} - Q_{\text{л}} \sin \alpha_{\text{л}} &= 0; \\ m_{\text{в}_1} \ddot{x}_{\text{в}_1} - R_{\text{л}} + R_{\text{в}_1} + B_{\text{в}_1} + W_{\text{в}_1} - Q_{\text{в}_1} \sin \alpha_{\text{в}_1} &= 0; \\ \dots \dots \dots \\ m_{\text{в}_j} \ddot{x}_{\text{в}_j} + R_{\text{в}_j} - R_{\text{в}_{j-1}} + B_{\text{в}_j} + W_{\text{в}_j} - Q_{\text{в}_j} \sin \alpha_{\text{в}_j} &= 0; \\ \dots \dots \dots \\ m_{\text{в}_n} \ddot{x}_{\text{в}_n} - R_{\text{в}_n} + B_{\text{в}_n} + W_{\text{в}_n} - Q_{\text{в}_n} \sin \alpha_{\text{в}_n} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $m_{\text{л}}$, $m_{\text{в}}$ – масса соответственно локомотива и j -го вагона поезда ($j = 1, 2, \dots, n$), т; $\ddot{x}_{\text{л}}$ – продольное ускорение соответственно локомотива, м/с^2 ; $\ddot{x}_{\text{в}_1}$, $\ddot{x}_{\text{в}_j}$, $\ddot{x}_{\text{в}_n}$ – продольное ускорение первого, j -го, n -го вагона поезда, м/с^2 ; $R_{\text{л}}$, $R_{\text{в}_j}$ – силы в междувagonных связях соответственно локомотива и j -го вагона поезда, Н; $B_{\text{л}}$, $B_{\text{в}_j}$ – силы торможения соответственно локомотива и j -го вагона поезда, Н; $W_{\text{л}}$, $W_{\text{в}_j}$ – силы основного сопротивления дви-

жению соответственно локомотива и j -го вагона поезда, H ; Q_L , Q_{Bj} – силы от уклона пути локомотива и j -го вагона поезда, H ; α_L – уклон пути локомотива; $\alpha_B, \alpha_j, \alpha_n$ – уклон пути локомотива, первого, j -го, n -го вагона поезда.

Приняты следующие начальные условия: при $t = 0$: $x(0) = 0$; $\dot{x}(0) = v_0$, где $x(0)$ – величина перемещения поезда на участке пути, м; $\dot{x}(0) = v_0$ – начальная скорость, соответствующая скорости движения поезда на момент включения торможения, м/с. Масса локомотива принята равной 128 т; масса каждого из 20 вагонов поезда принята равной 61 т; коэффициент инерции вращающихся масс для локомотива принят $\gamma_L = 0,115$, а для пассажирских вагонов $\gamma_B = 0,042$ [1]; уклон профиля пути составляет 6 ‰. Численное интегрирование систем дифференциальных уравнений (1), (2) проводилось для скорости 120 км/ч на момент начала торможения поезда. Расчеты проводены в среде MathCAD.

В среде инженерного анализа MSC.ADAMS разработана компьютерная модель поезда (рис. 2), соответствующая расчетным схемам (рис. 1). При моделировании приняты следующие допущения: локомотив и вагоны считаются абсолютно твердыми телами, массы которых сосредоточены в их центрах масс; вертикальные колебания и угловые перемещения вагонов отсутствуют. Межвагонные соединения заменены аналоговыми пружинами с соответствующими коэффициентами жесткости и демпфирования, находящимися в начальный момент движения в ненагруженном состоянии.

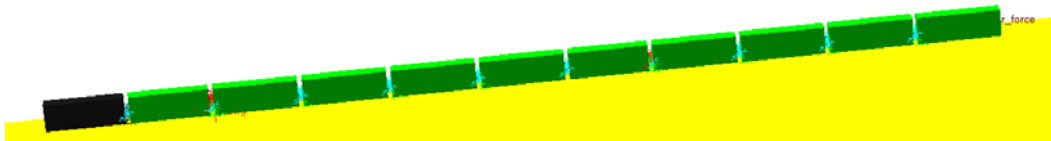


Рис. 2. Компьютерная модель поезда

Проведен сравнительный анализ с результатами, полученными аналитически и на основе компьютерного моделирования (рис. 3).

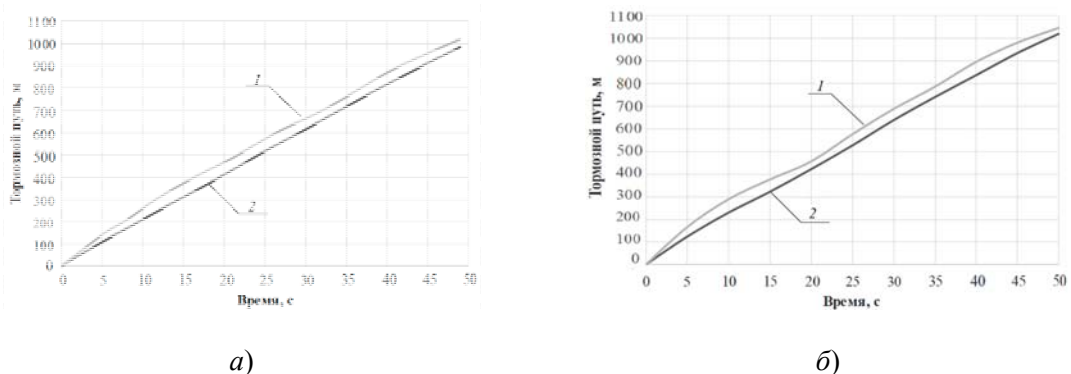


Рис. 3. Зависимости тормозного пути от времени для случая торможения поезда на прямолинейном (а) и криволинейном (б) пути, полученные на основе аналитического 1 и компьютерного 2 расчетов

Результаты расчетов тормозного пути при движении по прямолинейному и криволинейному в профиле участкам пути, полученные на основе аналитического

расчета и компьютерного моделирования, различаются соответственно на 2,3 и 3,5 %, что свидетельствует об адекватности разработанной компьютерной модели.

Литература

1. Вершинский, С. В. Динамика вагонов / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов. – Москва : Транспорт, 1991. – 360 с.
2. Галай, Э. И. Тормозные системы железнодорожного транспорта. Расчет пневматических тормозов / Э. И. Галай, Е. Э. Галай, П. К. Рудов. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 271 с.
3. Varazhun, I. Determination of Longitudinal Forces in the Cars Automatic Couplers at Train Electrodynamic Braking / I. Varazhun, A. Shimanovsky, A. Zavarotny // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 134. – P. 415–421.

УДК 621.313

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РОТОРАХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д. В. Комнатный

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Рассмотрен расчет электромагнитных полей в электродвигателях, в конструкциях которых используются композитные материалы. Записаны уравнения Максвелла и материальные уравнения для квазистационарных полей в композитных материалах. Приведены уравнения Максвелла и граничные условия для поля в двухслойной сфере металл–композит. Описан способ получения расчетных соотношений для составляющих электромагнитного поля.

Ключевые слова: электрические двигатели, композитные материалы, уравнения Максвелла, материальные уравнения, граничные условия, двухслойная сфера металл–композит, ротор.

METHODS OF ELECTROMAGNETIC FIELD ANALYSIS IN ELECTRIC MOTOR ROTORS, MANUFACTURED FROM COMPOSITE MATERIALS

D. V. Komnatny

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The electromagnetic fields calculation in electric motors, in which design composite materials are used, is discussed. Maxwell's equations, constructive relations for quasi-stationary electromagnetic fields in composite materials are recorded. The Maxwell's equations and boundary conditions for the field in two-layer metal-composite sphere are adduced. The method of calculation relations for electromagnetic field components obtaining is described.

Keywords: electric motors, composite materials, Maxwell's equations, constructive relations, boundary conditions, two-layer metal-composite sphere, rotor.

В настоящее время широкое распространение получили индивидуальные средства электротранспорта: скутеры, катера, самокаты, дроны, автомобили. Для облегчения этих машин применяются электродвигатели с конструктивными элементами, изготовленными из композитных материалов. Такие материалы являются новыми для электромашиностроения, поэтому актуальной задачей является анализ электро-