



Моделирование неровностей рельсового пути тоннеля метрополитена



Евгений СЕРДОБИНЦЕВ
Evgeny V. SERDOBINTSEV

Йе Вин ХАН
Ye Win HAN



Сердобинцев Евгений Васильевич — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Йе Вин Хан — аспирант МИИТ, Москва, Россия / Янгон, Республика Союз Мьянма.

**Simulation of Irregularities of Subway
Tunnel Track**
(текст статьи на англ.яз. – English text of
the article – p.36)

**Авторами представлены методика
и результаты моделирования
эквивалентной геометрической
неровности рельсового пути
тоннеля метрополитена для
решения задачи исследования
случайных колебаний пассажирских
вагонов. Сгенерированный под
эти цели процесс возмущения
обеспечивается с помощью
приближенного метода скользящего
суммирования. Демонстрируются
два возможных подхода, каждый
из которых предполагает свой
исследовательский диапазон.**

Ключевые слова: метрополитен,
рельсовый путь, подвижной состав,
тоннель, геометрическая неровность,
математическая модель, спектральная
плотность.

Рельсовый путь в тоннеле метрополитена имеет некоторые отличия от конструкции наземного железнодорожного пути. Поэтому при исследовании методом математического моделирования линейных и нелинейных колебаний метровагонов для решения системы дифференциальных уравнений необходимо иметь «сгенерированный» случайный процесс возмущения. В качестве такового обычно принимают эквивалентную геометрическую неровность $\eta(t)$. Генерацию подобного рода можно выполнить приближенным методом скользящего суммирования, подробное описание которого приведено в [1].

Для решения задачи, касающейся динамики вагонов метрополитена, это было сделано в соответствии с заданной спектральной плотностью случайного процесса эквивалентной геометрической неровности рельсового пути тоннеля $G_{\eta}(\omega)$. Использована спектральная плотность, полученная при обработке результатов динамико-прочностных испытаний вагона модели 81.717, проведенных в 1984 году Мытищинским машиностроительным заводом совместно с кафедрой «Электрическая тяга»

Таблица 1

Параметры аналитического выражения спектральной плотности

Номер составляющей спектра	α_j , рад/с: м/с	ω_j , рад/с: м/с	a_j
1	1,0	0	0,697
2	0,0018	0,20096	0,12
3	0,002	0,25749	0,109
4	0,01	0,314	0,074

МИИТ на кольцевой и Горьковско-Замоскворецкой линиях Московского метрополитена. Она аппроксимирована, как предложено в [2], аналитическим выражением, которое соответствует дифференцируемому случайному процессу:

$$G_{\eta}(\omega, v) = \frac{S_{\eta}^2}{2\sqrt{\pi}} \sum_{j=1}^n \frac{a_j}{\alpha_j \cdot v} \left\{ \exp \left[-\frac{(\omega + \omega_j v)^2}{4\alpha_j^2 v^2} \right] + \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_j v)^2}{4\alpha_j^2 v^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

где S_{η}^2 — дисперсия эквивалентной геометрической неровности (в расчетах $S_{\eta}^2 = 13,01 \text{ мм}^2$); ω — текущее значение частоты, рад/с; ω_j — частота j-го максимума спектральной плотности; a_j — доля дисперсии, приходящейся на j-й максимум спектральной плотности; α_j — половина ширины j-го максимума спектральной плотности на половине его высоты.

Полученные при аппроксимации параметры аналитического выражения $G_{\eta}(\omega)$ для скорости движения $v = 1 \text{ м/с}$ приведены в таблице 1.

В ходе моделирования $\eta(t)$ методом скользящего суммирования возможны два подхода. В первом моделируют эквивалентную геометрическую неровность для скорости движения 1 м/с, а затем при определении динамики вагона метрополитена «движутся» по этой неровности с нужной скоростью. Этот подход главенствует в исследовании колебаний математических моделей подвижного состава при их движении по смоделированному участку пути с переменной скоростью в соответствии с эксплуатационным графиком. Известно, что движение с переменной скоростью является основным при эксплуатации вагонов метрополитена. Например, на кольцевой линии Московского метрополитена движение вагонов с постоянной скоростью составляет всего 20% от общего времени движения.

Если использовать данный подход для исследования колебаний математических моделей при их движении с постоянной скоростью, то тогда потребуются на каждой скорости проезжать весь моделируемый участок пути. Только в этом случае спектральная плотность смоделированного случайного процесса $\eta(t)$ будет соответствовать заданной выражением (1). Такая особенность приводит к усложнению обработки результатов, поскольку на каждой скорости движения получается различная длительность реализаций случайных процессов реакций динамической модели экипаж—путь на входное возмущение.

Во втором подходе моделируют эквивалентную геометрическую неровность для каждой скорости движения в принятом программой исследовании диапазоне. При этом, применяя алгоритм, приведенный в [1], имитируется реализация неровностей применительно к набору необходимых скоростей, под которые параметры выражения (1) α_j и β_j (таблица 1) пересчитывались с $v = 1 \text{ м/с}$. На кафедре «Электропоезда и локомотивы» МИИТ шаг дискретизации при генерации $\eta(t)$ обычно принимают равным $\Delta t = 0,001 \text{ с}$. Длина каждой реализации неровности — $t_p = 32,768 \text{ с}$, число точек реализации реакции динамической системы экипаж—путь составляет $N = 32768$, что соответствует 2^{15} . Это нужно для выполнения спектрального анализа

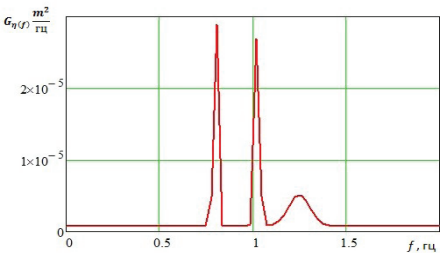


Рис. 1. Спектральная плотность эквивалентной геометрической неровности при скорости движения $v = 90 \text{ км/ч}$.





с помощью быстрого преобразования Фурье.

В качестве примера на рис. 1 приведен график спектральной плотности эквивалентной геометрической неровности, вычисленный по выражению (1) для $v=90$ км/ч.

Полученные таким способом неровности могут быть использованы при исследовании колебаний динамических моделей и других типов вагонов метрополитена

с близкой нагрузкой от колесной пары на рельс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков А. И. Моделирование на ЦВМ горизонтальных случайных неровностей пути при исследовании нелинейных колебаний рельсовых экипажей // Оборудование и эксплуатация электроподвижного состава: Сб. науч. трудов МИИТ. – Вып. 738. – М., 1983. – С. 151–155.
2. Савоськин А. Н. О выборе аналитического выражения для функции спектральной плотности случайных колебательных процессов // Труды МИИТ. – Вып. 373. – М., 1971. – С. 78–85.

Координаты авторов: Сердобинцев Е. В. – + 7 (499) 978–71–52, Ёе Вин Хан – yewinhan@mail.ru
Статья поступила в редакцию 10.10.2014, актуализирована 18.12.2014, принята к публикации 15.01.2015.

Статья подготовлена на основе материалов, представленных авторами 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).

SIMULATION OF IRREGULARITIES OF SUBWAY TUNNEL TRACK

Serdobintsev, Evgeny V., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.
Ye Win Han, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Yangon, Republic of the Union of Myanmar.

ABSTRACT

Track in subway tunnel has some differences from the design of ground railway track. Therefore, to proceed with a study using the method of mathematical modeling of linear and nonlinear oscillations of subway cars for solving a system of differential equations, it is necessary to have a «generated» random disturbance process. The objective of the authors was to present methodology and results of simulation of equivalent geometrical irregularities of subway track tunnel to solve the

problem of research of random fluctuations of passenger cars. The authors used simulation method, mathematical calculations and analysis. Perturbation process, generated for these purposes, is provided by the approximate method of moving summation. Two possible approaches are shown, each of which includes a range of research and computation. Irregularities obtained by those methods can be used to study oscillations of dynamic models of subway cars with a similar load from a wheel set on a rail.

Keywords: subway, track, rolling stock, tunnel, geometrical irregularity, mathematical model, spectral density.

Background. Track in subway tunnel has some differences from the design of ground railway track. Therefore, it is necessary to base on a «generated» random disturbance process in the study using the method of mathematical modeling of linear and nonlinear oscillations of subway cars for solving a system of differential equations. As such, generally equivalent geometric irregularity $\eta(t)$ is taken. The generation of this kind can be carried out by approximate method of moving summation, a detailed description is given in [1].

Objective. The objective of the authors is to present methodology and results of simulation of equivalent geometrical irregularities of subway track tunnel.

Methods. The authors use simulation method, mathematical calculations and analysis.

Results. To solve the problem concerning the dynamics of subway cars, a generation was produced in accordance with a given spectral density of a random process of equivalent geometrical irregularity of tunnel track $G_\eta(\omega)$. Spectral density was used, which was obtained by processing the results of dynamic-strength tests of cars of 81.717 model, conducted in 1984 by Mytishchi machine-building plant in cooperation with the department of «Electric Traction» of MIIT on the ring and Gorky-Zamoskvoretskaya lines of the Moscow Metro. Spectral density was approximated as proposed in [2], with an analytical expression that corresponds to a differentiable random

process:

$$G_\eta(\omega, v) = \frac{S_\eta^2}{2\sqrt{\pi}} \sum_{j=1}^n \frac{a_j}{\alpha_j \cdot v} \left\{ \exp \left[-\frac{(\omega + \omega_j v)^2}{4\alpha_j^2 v^2} \right] + \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_j v)^2}{4\alpha_j^2 v^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

where S_η^2 is variance of equivalent geometrical irregularity (in calculations $S_\eta^2 = 13,01 \text{ mm}^2$); ω is current frequency, rad/s; ω_j is frequency of the j -th maximum of spectral density; a_j is proportion of variance attributable to the j -th maximum of spectral density; α_j is half width of the j -th maximum of spectral density at half of its height.

Parameters of an analytical expression $G_\eta(\omega)$ for the velocity of $v = 1 \text{ m/s}$, obtained at approximation, are shown in Table 1.

During the simulation of $\eta(t)$ by moving summation two approaches are possible. Within the first one equivalent geometric irregularity is simulated for the speed of 1 m/s , and then in order to determine the dynamics of subway cars they «move» on this irregularity at the correct speed. This approach dominates