



Вертикальные колебания метровагона с пневмоподвешиванием



Евгений СЕРДОБИНЦЕВ
Evgeny V. SERDOBINTSEV

Йе Вин ХАН
Ye Win HAN



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

Йе Вин Хан — аспирант МИИТ (Мьянма).

В рамках сотрудничества правительственных структур Республики Мьянма и российских специалистов реализуются проекты создания метрополитена в крупнейшем городе страны Янгоне. Подготовка технического задания на изготовление подвижного состава, адаптированного к местным условиям, включает исследования динамических свойств метровагона. Один из вариантов связан с использованием математической модели для изучения кинематических характеристик пневморессор в кузовной конструкции. Публикуемая статья знакомит с результатами сравнительного анализа разных модельных схем, включая оценку качественных показателей при пружинном и пневматическом центральном рессорном подвешивании вагона метрополитена.

Ключевые слова: метрополитен, Мьянма, Янгон, подвижной состав, рессорное подвешивание, пневматика, параметры качества, математическая модель, сравнительный анализ.

Республика Мьянма — государство в Юго-Восточной Азии, расположенное в западной части полуострова Индокитай. Крупнейшим ее городом является Янгон. Он наиболее развитый в экономическом и промышленном отношении. Площадь Янгона — около 350 кв. км, население — 6 млн человек. Территория города делится на 45 районов. Для обеспечения связи между ними, перевозок пассажиров в городе, к сожалению, нет не только метрополитена, как в других столь же крупных городах мира, но даже и трамвая. Основной вид транспорта здесь — автобус. Его дополняют городские железнодорожные линии и речные суда для перевозки грузов и пассажиров.

Чтобы решить проблемы городского транспорта, Янгону необходимо обзавестись метрополитеном. И руководство Мьянмы планирует его построить с помощью специалистов из Российской Федерации.

Вопрос о закупке в какой-либо из стран подвижного состава (ПС) для будущего метрополитена пока открыт. В связи с этим имеется потребность в разработке технического задания на изготовление адапти-

рованного к местным условиям ПС. При создании технического задания надо выбрать в том числе и параметры рессорного подвешивания для обеспечения комфорта пассажиров и безопасности движения вагона в рельсовой колее. Правильность такого выбора нам и предстоит проверить, проведя на математической модели предварительные исследования динамических свойств вагона метрополитена.

I.

В [1] было рассмотрено решение подобной задачи, но в конструкции центральной ступени рессорного подвешивания предложенной модели использованы пружины с параллельно включенными с ними гидравлическими гасителями. В современных аналогах, как правило, устанавливают пневморессоры.

В [2] предложена механо-математическая модель пневморессоры с одним дополнительным резервуаром. Она приведена на рис. 1а.

Там же в [2] приведена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих колебания массы m , опирающейся на пневморессору.

Система уравнений имеет вид:

$$m\ddot{z} + \beta_{21} \left[(z - y) + \mu_1 (z - y)^3 \right] = 0;$$

$$\beta_{21} \dot{y} = \beta_{21} \sqrt{\left[(z - y) + \mu_1 (z - y)^3 - \lambda (y + \lambda^2 \mu_1 y^3) \right]} \cdot \text{sign} \left[(z - y) + \mu_1 (z - y)^3 - \lambda (y + \lambda^2 \mu_1 y^3) \right].$$

В этих уравнениях обозначено:

z — перемещение центра массы m ;

β_{21} — жесткость пневморессоры при отключенном дополнительном резервуаре;

$$\beta_{21} = \frac{nPS_M^2}{V_1};$$

β_n — коэффициент затухания, определяемый протеканием воздуха через дроссель, $\beta_{21} = \beta_n$;

$$\beta_n = \frac{nPS_g^{2,5}}{\mu d_{др}} \sqrt{\frac{n}{2RTV_1}};$$

S_g — эффективная площадь пневморессоры ($S_M = \frac{\pi D_M^2}{4}$);

D_g — эффективный диаметр пневморессоры;

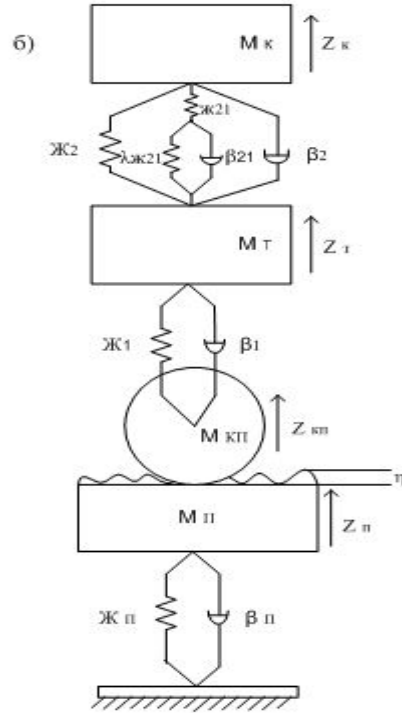
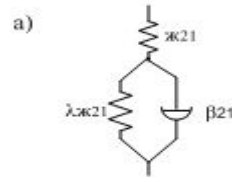


Рис. 1. Механо-математическая модель пневморессоры с одним дополнительным резервуаром (а) и расчётная кинематическая схема (б).

$\lambda = \frac{V_1}{V_2}$ — отношение объемов воздуха

в основном (V_1) и дополнительном (V_2) резервуарах;

P — давление воздуха в пневморессоре и дополнительном резервуаре в положении статического равновесия;

n — показатель адиабаты; R — газовая постоянная;

T — абсолютная температура воздуха в пневморессоре, равная температуре окружающей среды;

$y = \frac{q}{\rho S_-}$ — величина деформации об-

ложки пневморессоры;

ρ — плотность воздуха;





80

q — масса воздуха, протекающего через дроссель при заданной величине деформации оболочки пневморессоры;

l_{op} и d_{op} — длина и диаметр дросселя в виде жиклера с круглым отверстием;

μ — коэффициент расхода воздуха, протекающего через дроссель;

$$\mu_1 = (n+1)(n+2) \left(\frac{SM}{V_1} \right)^2.$$

Для составления уравнений колебаний заменим реальный вагон метрополитена упрощенной расчетной кинематической схемой, представленной на рис. 16. На схеме приняты следующие обозначения:

m_k — масса кузова;

m_t — обрессоренная масса двух тележек;

m_{kn} — масса четырех колесных пар; m_{Π} — приведенная к четырем колесным парам масса рельсового пути тоннеля метрополитена;

β_1 — суммарный коэффициент затухания в буксовой ступени рессорного подвешивания;

$\mathcal{K}_1$ — суммарная жесткость буксовой ступени рессорного подвешивания;

β_{Π} — суммарный коэффициент затухания в рельсовом пути тоннеля метрополитена;

$\mathcal{K}_{\Pi}$ — суммарная жесткость рельсового пути тоннеля метрополитена;

На этой схеме также показана обобщенная механическая модель центральной ступени рессорного подвешивания. Здесь упругие элементы $\mathcal{K}_{21}$, $\lambda \mathcal{K}_{21}$ и диссипативный элемент β_{21} относятся к схеме с пневматическим центральным рессорным подвешиванием, а $\mathcal{K}_2$ и β_2 — к схеме с пружинным центральным рессорным подвешиванием.

Из предложенной кинематической схемы видно, что колебания принятой для исследования модели вагона могут быть описаны обобщенными координатами: подпрыгиванием z_k кузова; подпрыгиванием z_t рам тележек; подпрыгиванием z_{kn} , колесных пар; подпрыгиванием z_{Π} приведенных к колесным парам масс рельсового пути тоннеля метрополитена. В качестве возмущения принята эквивалентная геометрическая неровность $\eta(t)$.

Центры подвижных систем координат располагаются в центре масс соответствующих элементов модели вагона.

При решении подобных задач обычно принимается допущение, что колесная пара и приведенная к ней масса рельсового пути движутся безотрывно $z_{\Pi} = z_{kn} - \eta$. Тогда расчетная кинематическая схема будет иметь три степени свободы.

В случае использования в центральной ступени рессорного подвешивания пружин и гидравлических гасителей система уравнений имеет вид:

$$m_k \ddot{z}_k + \beta_2 \dot{z}_k + \mathcal{K}_2 z_k - \beta_2 \dot{z}_m - \mathcal{K}_2 z_m = 0;$$

$$m_m \ddot{z}_m + (\beta_1 + \beta_2) \dot{z}_m + (\mathcal{K}_1 + \mathcal{K}_2) z_m - \beta_2 \dot{z}_k - \mathcal{K}_2 z_k - \beta_1 \dot{z}_{kn} - \mathcal{K}_1 z_{kn} = 0;$$

$$(m_{kn} + m_n) \ddot{z}_{kn} + (\beta_1 + \beta_n) \dot{z}_{kn} + (\mathcal{K}_1 + \mathcal{K}_n) z_{kn} - \beta_1 \dot{z}_m - \mathcal{K}_1 z_m =$$

$$= m_n \ddot{\eta} + \beta_n \dot{\eta} + \mathcal{K}_n \eta.$$

А в случае использования в центральной ступени рессорного подвешивания пневморессоры:

$$m_k \ddot{z}_k + 4\beta_{21} \dot{z}_k - 4\beta_{21} \dot{z}_m + 4\mathcal{K}_{21} (z_k - y) - \mu_1 (z_k - y)^3 = 0;$$

$$m_m \ddot{z}_m + (4\beta_{21} + \beta_1) \dot{z}_m - 4\beta_{21} \dot{z}_k - \beta_1 \dot{z}_{kn} - \mathcal{K}_1 z_{kn} + 4\mathcal{K}_{21}$$

$$\cdot ((z_m - y) + \mu_1 (z_m - y)^3) + \mathcal{K}_1 z_m = 0.$$

$$4\beta_{21} \dot{y} = 4\mathcal{K}_{21} \sqrt{((z_k - y) + \mu_1 (z_k - y)^3) - \lambda(y + \lambda^2 \mu_1 y^3)} \cdot$$

$$\cdot \text{sign}[(z_k - y) + \mu_1 (z_k - y)^3 - \lambda(y + \lambda^2 \mu_1 y^3)]$$

$$(m_{kn} + m_n) \ddot{z}_{kn} + (\beta_1 + \beta_n) \dot{z}_{kn} + (\mathcal{K}_1 + \mathcal{K}_n) z_{kn} - \beta_1 \dot{z}_m - \mathcal{K}_1 z_m =$$

$$= m_n \ddot{\eta} + \beta_n \dot{\eta} + \mathcal{K}_n \eta.$$

Параметры модели вагона метрополитена и рельсового пути тоннеля, необходимые для выполнения расчетов приведены в таблице 1. Они приняты в соответствии с рекомендациями, приведенными в [1]. В этой же таблице даны параметры [3] для пневморессоры с резинокордной оболочкой модели Н-6.

Обычно при исследовании вынужденных случайных вертикальных колебаний моделей рельсовых экипажей решение систем дифференциальных уравнений выполняют в частотной области, однако в связи с тем, что предполагается рассмотрение вариантов применения нелинейной модели пневморессоры [2], было решено выполнить исследование во временной области на основе решения системы уравнений методом Рунге-Кутты IV порядка.

Для решения уравнений необходимо было выполнить «генерацию» случайного процесса возмущения $\eta(t)$. Это сделано в соответствии с принятой спектральной плотностью случайного процесса эквива-

лентной геометрической неровности рельсового пути тоннеля метрополитена $G_\eta(\omega)$. Операция выполнена приближенным методом скользящего суммирования, подробное описание реализации которого для подобных задач приведено в [4].

II.

В качестве спектральной плотности $G_\eta(\omega)$ принята спектральная плотность, полученная при обработке результатов динамико-прочностных испытаний вагона метрополитена модели 81.717, выполненных в 1984 году Мытищинским машиностроительным заводом совместно с кафедрой «Электрическая тяга» МИИТ. Испытания проводились на Кольцевой и Горьковско-Замоскворецкой линиях Московского метрополитена. Для использования в расчетах спектральная плотность была аппроксимирована, как предложено в [5], аналитическим выражением, которое соответствует дифференцируемому случайному процессу (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 2.

При моделировании $\eta(t)$ методом скользящего суммирования возможны два подхода. В первом моделируют эквивалентную геометрическую неровность для скорости движения $v = 1 \text{ м/с}$, а затем при решении задачи «движутся» по этой неровности с необходимой скоростью. Такой подход является основным для исследования колебаний динамических моделей ПС на смоделированном участке пути с пере-

Таблица 1
Значения параметров, использованных при расчетах

№	Обозначение	Размерность	Значение параметра
1.	τ_k	т	40,875
2.	τ_r	т	9,2
3.	m_{kp}	т	6,08
4.	m_n	т	8,88
5	$ж_1$	кН/м	7409,91
6	β_1	кНс/м	230,97
7	$ж_2$	кН/м	8696,81
8	β_2	кНс/м	238,49
9	$ж_n$	кН/м	1200000
10	β_n	кНс/м	360
11	D_a	м	0,54
12	V_1	м ³	0,028
13	V_2	м ³	0,1
14	P	Н/м ²	4,59306
15	n		1,4
16	R	Дж/кгК	287,1
17	$d_{до}$	м	0,012
18	$l_{до}$	м	0,072
19	μ		0,75

менной скоростью в соответствии с эксплуатационным графиком. Если использовать подобный вариант в ходе изучения колебаний динамических моделей при их движении с постоянной скоростью, то будет необходимо на каждой скорости проезжать весь моделируемый участок пути. Только тогда спектральная плотность смоделированного случайного процесса $\eta(t)$ станет соответствовать задаваемой выражением (1).

Продемонстрированный подход приводит к усложнению процесса обработки результатов, так как на каждой скорости движения получается различная длительность реализаций случайных реакций динамической модели «экипаж–путь» на входное возмущение.

Во втором подходе моделируют эквивалентную геометрическую неровность для каждой скорости движения в принятом для исследования диапазоне. В соответствии

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





Таблица 2

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

с ним, применяя алгоритм, приведенный в [4]; нами смоделирована реализация неровностей для скоростей движения $v = 40, 50, 60, 70, 80, 90$ км/ч. При этом параметры выражения (1) α_j и β_j (таблица 2) пересчитывались с $v = 1$ м/с на необходимую скорость движения. Шаг дискретизации при «генерации» $\eta(t)$: $\Delta t = 0,001$ с. Длина каждой реализации неровности: $t_p = 32,768$ с. В этом случае число точек реализации реакции динамической системы «экипаж-путь» составляет $N = 32768$, что соответствует 2^{15} . Данные нужны для выполнения спектрального анализа с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ).

В качестве показателей динамических качеств (ПДК) при сравнении вариантов использования в центральной ступени рессорного подвешивания пружин с гидравлическими гасителями или пневморессор были приняты:

- коэффициенты динамики в центральной и буксовой ступенях рессорного подвешивания $K_{д2}$ и $K_{д1}$;
- максимальное значение вертикальных ускорений в центре массы кузова $\ddot{z}_{\max}$;
- коэффициент плавности хода C .

Коэффициенты динамики в данной работе определялись как отношение максимального значения динамического уси-

лия $F_{48=}^{\max}$ в указанных ступенях рессорного подвешивания к его статическому значению $F_{стат}$.

$$k_4 = \frac{F_{48=}^{\max}}{F_{АВВ}}. \quad (2)$$

Максимальные значения реализаций случайных реакций динамической модели $q(t)$ на случайное входное возмущение $\eta(t)$ отвечали средним значениям абсолютных максимумов, которые в [6] рекомендовано находить как

$$\bar{H}_q \cong S_q \left(\sqrt{2 \ln f_s t_{\oplus}} + \frac{1}{\sqrt{2 \ln f_s t_{\oplus}}} \right), \quad (3)$$

где f_e – эффективная частота случайного процесса;

t_p – время реализации случайного процесса (принималось равным $t_p = 32,768$ с);

S_q – среднее квадратичное отклонение случайного процесса.

В качестве случайных процессов $q(t)$ были приняты: усилие в буксовой ступени рессорного подвешивания $F_1(t)$, усилие в центральной ступени рессорного подвешивания $F_2(t)$ и ускорение центра массы кузова $\ddot{z}_k(t)$. Величина f_e отражала уровни реализации $q(t)$:

$$f_e = \frac{n_0}{2t_p}, \quad (4)$$

где n_0 – число нулей случайного процесса $q(t)$.

Значение среднего квадратичного отклонения S_q также находилось непосредственно по реализациям $q(t)$:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}, \quad (5)$$

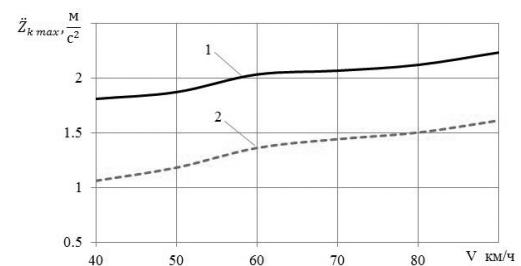
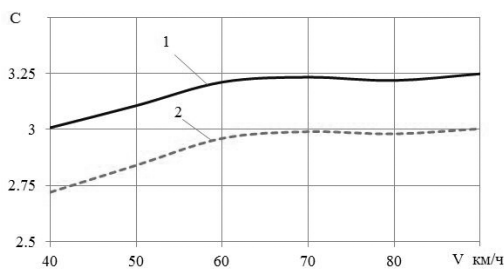


Рис. 2. Зависимости показателей качества от скорости движения. 1 – пружинное центральное рессорное подвешивание; 2 – пневматическое центральное рессорное подвешивание.

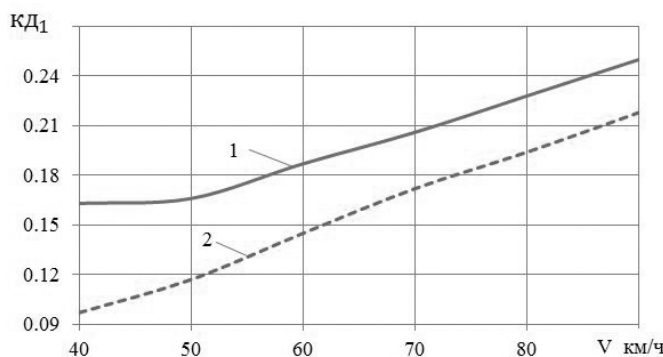
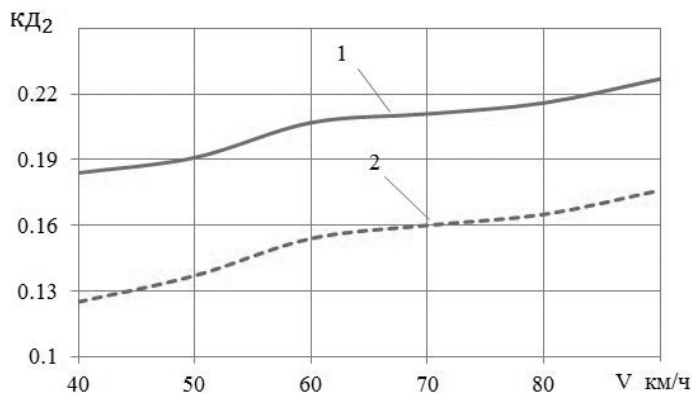


Рис. 3. Зависимости показателей качества от скорости движения. 1 – пружинное центральное рессорное подвешивание; 2 – пневматическое центральное рессорное подвешивание.



где $\bar{q}$ – среднее значение случайного процесса $q(t)$.

Алгоритм спектрального анализа при использовании БПФ (быстрое преобразование Фурье) с учетом фильтрации исходной случайной реализации $q(t)$ и сглаживания фильтром Ю. Ханна полученной при этом оценки $G_q(\omega)$ спектральной плотности подробно рассмотрен в [7].

Коэффициент плавности хода по реализациям случайного процесса ускорений кузова длительностью t_p вычислялся нами в соответствии с выражением, рекомендованным в [8]:

$$C = \alpha \cdot 6,67 \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{t_j}{t_p} \left(2 \int_{f_n}^{f_b} q_n^2(f) G_{\ddot{z}_{kj}}(f) df \right)}, \quad (6)$$

где α – коэффициент пропорциональности, $\alpha = 4,346$;

t_j – длительность j -й реализации,

$$t_p = \sum_{j=1}^n t_j;$$

f_n, f_b – соответственно нижняя и верхняя границы частотного диапазона анализируемой зависимости $\ddot{z}_k(t)$;

$G_{\ddot{z}_{kj}}(f)$ – оценка спектральной плотно-

сти j -й реализации случайного процесса ускорений центра масс кузова;

$q_n(f)$ – нормированная амплитудно-частотная характеристика корректирующего физиологического фильтра:

$$q_n(f) = 1,15 \sqrt{\frac{1 + 0,1f^2}{(1 + 4,04f^2)[(1 - 0,0364f^2) + 0,045f^2]}}. \quad (7)$$

Результаты расчетов в виде графиков зависимостей $C(v)$, $\ddot{z}_{k \max}(v)$, $K_{d2}(v)$ и $K_{d1}(v)$ приведены на рис. 2 и 3. Анализ этих графиков показывает, что при пневматическом подвешивании значения ПДК до скорости $v_{\max} = 90$ км/ч меньше тех же показателей при пружинном подвешивании: на 7–10% – для коэффициента плавности хода; на 27–45% – для максимального значения ускорений; на 22–37% – для коэффициента динамики K_{d2} ; на 6–45% – для коэффициента динамики K_{d1} .

Это свидетельствует о том, что применение пневморессор в центральной ступени подвешивания и по динамическим показателям предпочтительнее использования пружины.

Окончательный выбор параметров рессорного подвешивания вагона метрополитена, предполагаемого к эксплуатации





в городе Янгоне, может быть сделан после выполнения аналогичных исследований на пространственной модели, учитывающей наряду с подпрыгиванием и галопированием еще и боковую качку кузова, тележек и колесных пар.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тей Аунг. Обоснование схемы рессорного подвешивания вагонов метрополитена для колеи 1000 мм/ Дис... канд. техн. наук. — М., 2009. — 160 с.
2. Гольдштейн И. А. Колебания экипажа высокоскоростного наземного транспорта с электродинамическим подвесом и пневморессорами/ Дис... канд. техн. наук. — М., 1982. — 252 с.
3. Исследования по разработке и совершенствованию вагонов дизельпоездов. Этап I: Испытания и отработка элементов пневматического рессорного подвешивания дизельпоезда ДР5 с резинокордной оболочкой Н-6/ Отчет о НИР, том 2.

Гос. рег. № 01880028438, РФ ВНИИВ. — Рига, 1989. — 129 с.

4. 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. — М., 1983. — Вып. 738. — С. 151–155.
5. Савоськин А. Н. О выборе аналитического выражения для функции спектральной плотности случайных колебательных процессов // Труды МИИТ. — М., 1971. — Вып. 373. — С. 78–85.
6. Бирюков И. В., Савоськин А. Н., Бурчак Г. П. и др. Механическая часть тягового подвижного состава. — М.: Транспорт, 1992. — 440 с.
7. Кондрашов В. М. Единые принципы исследования динамики железнодорожных экипажей в теории и эксперименте. — М.: Интекст, 2001. — 190 с.
8. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак, А. П. Матвеевичев и др. — М.: Машиностроение, 1990. — 287 с.

VERTICAL OSCILLATIONS OF THE METRO WAGON WITH PNEUMATIC SUSPENSION

Serdobintsev, Evgeny V. – D. Sc. (Tech), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Ye Win Han – Ph.D. student of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Myanmar.

The public organizations of Myanmar and Russian experts cooperate in engineering of the metro in the country's largest city Yangon. The preparation of requirements specification for manufacturing of the rolling stock adapted for local conditions comprises a study on dynamic features of the metro wagon. One of

the directions of the study concerns mathematical model of kinematic characteristics of pneumatic springs in the body unit. The article refers to the results of comparative analysis of different model patterns, includes the assessment of quality performances as for spring and pneumatic central suspension of metro wagon.

Key words: metro, Myanmar, Yangon, rolling stock, springing, pneumatics, quality parameters, mathematical model, comparative analysis.

REFERENCES

1. Tey Aung. Substantiation of the pattern of springing of metro wagons for track gauge of 1000 mm [Obosnovanie skhemy ressonornogo podveshivaniya vagonov metropolitena dlya kolei 1000 mm]. Ph.D. (Tech) Thesis. Moscow, 2009, 160 p.
2. Goldshtein I. A. Oscillations of the car of high speed land transport with electrodynamic suspension and pneumatic springs [Kolebaniya ekipazha vysokoskorostnogo nazemnogo transporta s elektrodinamicheskim podvesom i pnevmoressorami]. Ph.D. (Tech) Thesis. Moscow, 1982, 252 p.
3. A study on engineering and amelioration of the wagons for diesel trains [Issledovaniya po razrabotke i sovershenstvovaniyu vagonov dizelpoezdov. etap I: ispytaniya i otrabotka elementov pnevmaticheskogo ressonornogo podveshivaniya dizelpoezda dr5 s rezinokordnoj obolochkoy n-6], Report on research, Vol.2, state register No 01880028438. Riga, 1989, 129 p.
4. Polyakov A. I. Simulation of random horizontal imperfections during studying nonlinear oscillations of rail wagons [Modelirovanie na tsvm gorizontalnykh sluchajnykh nerovnostey puti pri issledovanii nelinejnykh kolebaniy relsovykh ekipazhej]. Equipment and operation of electric

rolling stock (collection of scientific works) [Oborudovanie i ekspluatatsiya elektropodvizhnogo sostava: sb. nauch. trudov]. Moscow, MIIT, 1983, Iss. 738, pp. 151–155.

5. Savoskin A. N. On the choice of analytic expression for the function of spectral density of random oscillation processes [O vybore analiticheskogo vyrazheniya dlya funktsii spektralnoy plotnosti sluchajnykh kolebatelnykh protsessov]. Trudy MIIT [Works of MIIT]. Moscow 1971, Iss. 373, pp 78–85.
6. Biryukov I. V., Savoskin A. N., Burchak G. P. et al. Mechanical units of traction rolling stock [Mekhanicheskaya chast tyagovogo podvizhnogo sostava]. Moscow, Transport, 1992, 440 p.
7. Kondrashov V. M. The common principles of the studies on dynamics of railway cars for the theory and experiments [Edinye printsipy issledovaniya dinamiki zheleznodorozhnykh ekipazhej v teorii i eksperimente]. Moscow, Intext, 2001, 190 p.
8. Durability and reliability of railway rolling stock [Prochnost i bezotkaznost podvizhnogo sostava zheleznykh dorog]. Savoskin A. N., Burchak G. P., Matveevichev A. P. et al. Moscow, Mashinostroenie, 1990, 287 p.

Координаты авторов (contact information): Сердобинцев Е. В. (Serdobintsev E. V.) – 8 (499) 978–71–52, Йе Вин Хан (Ye Win Han) – Yewinhan9@gmail.com.

Статья поступила в редакцию / received 27.09.2012
Принята к публикации / accepted 11.02.2013