

троль. Диагностика. – 2002. – № 1. – С. 45-48. 6. Горкунов Э.С. и др. Моделирование диаграммы деформирования на основе измерения ее магнитных характеристик //Дефектоскопия. – 1997. – № 4. – С. 87-95.

*Поступила в редколлегию 23.07.2007.*

УДК 539.4:629.7.02

**В.А.ЖОВДАК**, докт. техн. наук; **А.Б.БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ**, канд. техн. наук; **М.М.СМИРНОВ**, канд. техн. наук; **Ю.Н.УЛЬЯНОВ**, канд. техн. наук; НТУ «ХПИ»; **С.И.ЯЦЬКО**, канд. техн. наук, УкрГ АЖТ; **О.В. ЧЕРНЫХ**, ГП «Харьковский метрополитен»

## **ВИБРОИЗМЕРЕНИЯ РАМ ТЕЛЕЖЕК ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ**

Розглядається методика проведення вібровимірювань рам візків вагонів метрополітену в умовах експлуатації. Обробка осцилограм здійснювалась за допомогою дискретного перетворення Фур'є. Використовувалася програма Microsoft Excel. Отримано спектр зовнішнього навантаження, що викликане нерівностями шляху. Також визначено спектр власних коливань рам візків, що підтверджується експериментальними даними. Результати статті будуть використані для вирішення задачі статистичної динаміки рам візків з урахуванням запізнювання зовнішнього навантаження на колісні пари візків та прогнозування безвідмовності рам візків.

The article represents the vibration-survey technique of bogie frames of transit vehicles under service conditions. The oscillogram processing was carried out by discrete Fourier transform. For this purpose program Microsoft Excel was used. The spectrum of external loading is defined. This loading is caused by track irregularities. Also the natural vibration spectrum of bogie frames is obtained and confirmed by experimental data. The results of this article will be used for solving the statistical dynamics problem and reliability prediction of bogie frames. The delay of external loading on the wheel pairs of bogie frames is taken into account.

**Введение.** Железнодорожный транспорт занимает ведущее место среди видов транспорта по объемам грузовых и пассажирских перевозок Украины. Неотъемлемой частью подвижного состава железнодорожного транспорта являются электропоезда метрополитенов, которые предназначены для обеспечения массовых перевозок пассажиров в транспортных системах больших городов. Однако во время эксплуатации вагонов электропоездов наблюдается большое количество отказов, значительный процент которых имеет механическое происхождение. Отдельно необходимо выделить возникновение усталостных трещин в сварных конструктивных элементах тележек вагонов. Указанные причины приводят к тому, что экономическая эффективность, а также показатели эксплуатации вагонов снижаются, что приводит к значительным расходам и возможности возникновения аварийных ситуаций. В связи с этим,

актуальной задачей является проведение виброизмерений рам тележек вагонов метрополитена в эксплуатационных условиях.

**1. Постановка задачи.** Колесно-редукторный блок (КРБ) электропоездов обеспечивает передачу крутящего момента от тягового двигателя к колесной паре [1]. Он состоит из тягового редуктора, колесной пары и буксовых подшипников.

Для проверки состояния основных узлов КРБ (подшипников, зубчатых зацеплений и т.д.) используются методы безразборной диагностики, позволяющие выявлять опасные повреждения. Среди этих методов широко применяются методы виброизмерений [2, 3]. Целью данной работы является исследование влияния динамических нагрузок на колесные пары тележки вагона, проведение анализа спектрального состава усилий на колесные пары и вибрационного состояния тележки, идентификация внешнего воздействия на рамы тележек, вызванного неровностями пути, необходимого для решения задачи случайных вынужденных колебаний рам тележек вагонов. Для этого проводилось измерение виброускорений при различных скоростях движения электропоезда.

**2. Описание эксперимента.** Главным и достаточно простым источником информации о динамических нагрузках, техническом состоянии пути и подвижного состава является вибрация узлов и конструкций вагона метро в эксплуатационных условиях. Однако здесь очень важным является выбор мест установки датчиков, поскольку от этого зависит степень информативности сигнала. Первые измерения [3] показали, что целесообразно сосредоточиться на оценке повторяемости вибраций в одинаковых условиях эксплуатации. Дополнительным условием измерений было поддержание при измерениях постоянной скорости движения состава. Кроме этого, для оценки уровня и спектрального состава помех был создан измеритель помех в виде резистора, помещенного в ферромагнитный корпус. Сопротивление резистора выбрано совпадающим с активным сопротивлением серийного пьезодатчика ускорений и равным 500 кОм. В качестве регистратора использовался серийный компьютер или специальное устройство для цифровой записи и спектрального анализа, основанного на алгоритме быстрого преобразования Фурье [3, 4]. Размещение датчиков, кабелей и регистратора представлено на рис. 1. Программа испытаний и количество измерений (записей осциллограмм) показаны в табл. 1.

**3. Методика обработки измерений и результаты.** Обработка осциллограмм осуществлялась в программе Microsoft Excel с помощью дискретного преобразования Фурье [3, 4].

Дискретное прямое преобразование Фурье  $X(k)$  для одномерного массива  $x(j)$  длины  $N$  имеет вид [3, 4]:

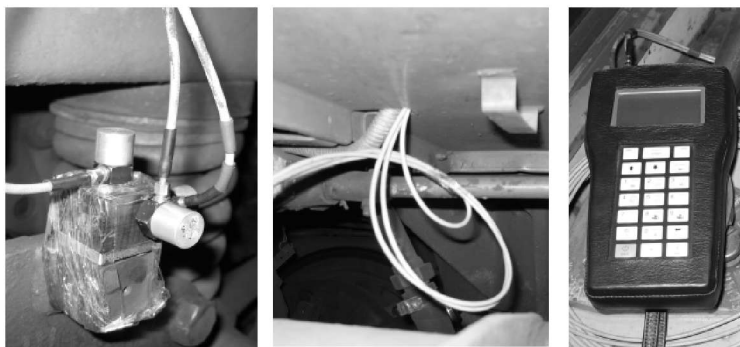


Рисунок 1 – Размещение вертикального и поперечного датчиков, ввод кабелей в кабину водителя и одноканальный цифровой спектроанализатор

Таблица 1 – Программа испытаний и количество измерений

Перегон	Место измерений	Направление измерений	Скорость движения, км/ч		
			50	60	70
Холодная Гора – Южный Вокзал	букса	вертикальное	5	4	3
	рама	вертикальное	5	4	3
		поперечное	5	4	3
Советская – пр. Гагарина	букса	вертикальное	5	4	3
	рама	вертикальное	5	4	3
		поперечное	5	4	3
Маршала Жукова – Советской Армии	букса	вертикальное	5	4	3
	рама	вертикальное	5	4	3
		поперечное	5	4	3

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) e^{2\pi/N(j-1)(k-1)}. \quad (1)$$

Основное назначение преобразования Фурье заключается в выделении частот и амплитуд регулярных составляющих сигнала, зашумленного помехами. Функция спектральной плотности характеризует распределение энергии случайного процесса по частотам спектра. Спектральная плотность внешнего воздействия для одного участка метрополитена определяется следующим образом [4]:

$$s_{xx}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} E \left[ |X_k(\omega, T)|^2 \right], \quad (2)$$

где  $E[\dots]$  – операция математического ожидания.

Тогда усредненная спектральная плотность для всей линии метрополитена имеет вид [4]:

$$\bar{S}(\omega) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{xx}^{(i)}(\omega), \quad (3)$$

где  $s_{xx}^{(i)}(\omega)$  – спектральная плотность внешнего воздействия для  $i$ -го участка метрополитена,  $n$  – число участков.

Среднеквадратичное отклонение (СКО) вертикальных ускорений определяется следующим образом [4]:

$$\sigma = \sqrt{\int_0^{\infty} \bar{S}(\omega) d\omega}. \quad (4)$$

По результатам проведения эксперимента с учетом соотношений (1)-(4) были получены графики СКО вертикальных ускорений буксового узла тележки вагона в Харьковском метрополитене на скоростях 50, 60 и 70 км/ч (рис. 2). На рис. 2 наблюдается общее возрастание уровней СКО вертикальных ускорений буксовых узлов колесных пар рам тележек при увеличении скорости движения с 50 до 70 км/ч. Также видно, что с увеличением скорости качественное распределение спектра не меняется, но появляются отдельные гармоники, зависящие от скорости движения электропоезда.

Для идентификации гармоник определим возможные частоты внешнего воздействия на тележку: частота вращения колесной пары (КП) [5]  $f_c = V/3,6\pi D_K$ , где  $V$  – скорость движения электропоезда (км/ч),  $D_K$  – диаметр круга катания бандажа,  $D_K = 0,78$  м [1]; шпальная частота [5]  $f_{шп} = \frac{V \cdot 6}{3,6\pi D_K}$ ; частота сопряжения зубьев [5]  $f_z = \frac{Z_3 V}{3,6\pi D_K}$ , где  $Z_3$  – число зубьев большого зубчатого колеса,  $Z_3 = 80$  [1]; частота вращения двигателя [5]  $f_D = \frac{i^2 V}{3,6\pi D_K}$ , где  $i^2$  – передаточное отношение,  $i^2 = 5,33$  [1].

Результаты расчета частот возможных внешних воздействий для скоростей 50, 60 и 70 км/ч представлены в табл. 2.

Как видно из рис. 2 и табл. 2, в спектре сигнала проявляются частоты, связанные с вращением колесной пары, двигателя, а также шпальные частоты.

На рис. 3 представлены графики спектральных плотностей вертикальных ускорений буксовых узлов колесных пар тележек вагонов метрополитена г. Харькова.

Как следует из рис. 3, кроме частот, зависящих от скорости движения электропоезда, в спектре сигнала присутствуют постоянные гармоники 7, 20 и 35 Гц, связанные с собственными колебаниями тележки.

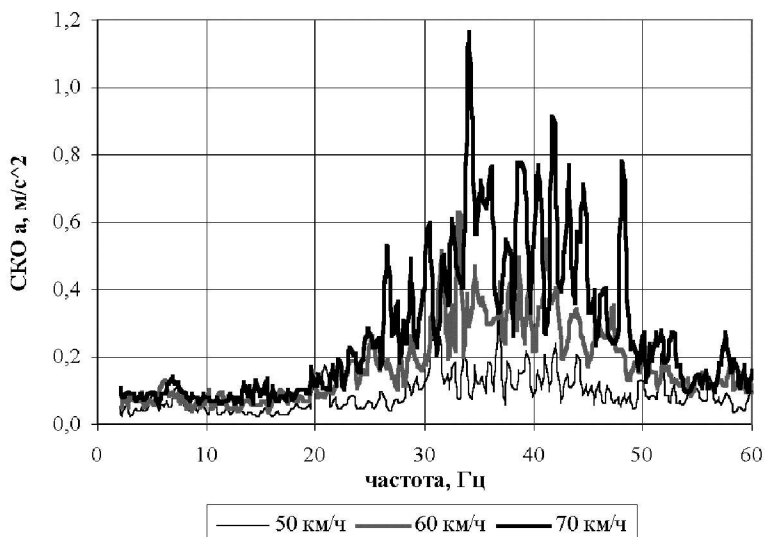


Рисунок 2 – СКО вертикальных ускорений буксового узла колесной пары тележки в метрополитене г. Харькова

Таблица 2 – Частоты возможных внешних воздействий

Наименование	Значение частоты (Гц) при скорости		
	50 км/ч	60 км/ч	70 км/ч
Частота вращения КП	5,67	6,8	7,94
Шпальная частота	34,02	40,8	47,61
Частота сопряжения зубьев	453,6	544	634,8
Частота вращения двигателя	30,22	36,24	42,29

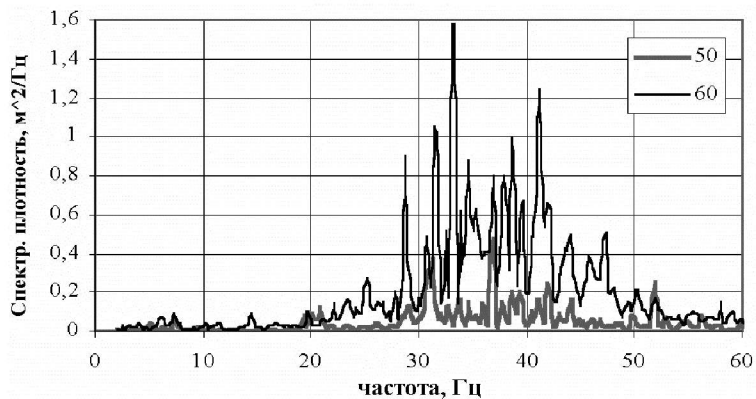


Рисунок 3 – Спектральная плотность вертикальных ускорений буксового узла

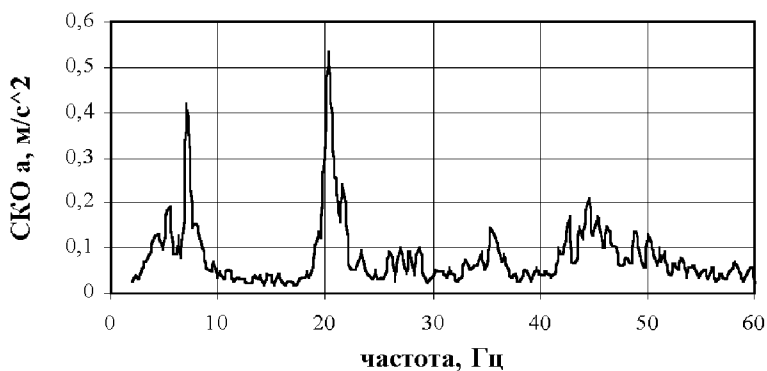


Рисунок 4 – SKO вертикальных ускорений, измеренных на раме тележки, для скорости 50 км/ч

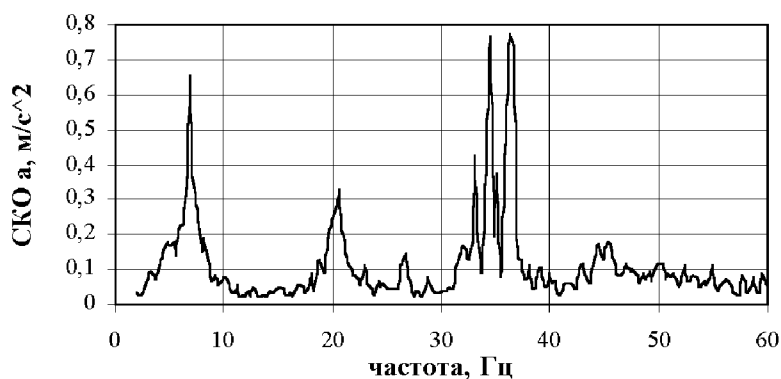


Рисунок 5 – SKO вертикальных ускорений, измеренных на раме тележки, для скорости 60 км/ч

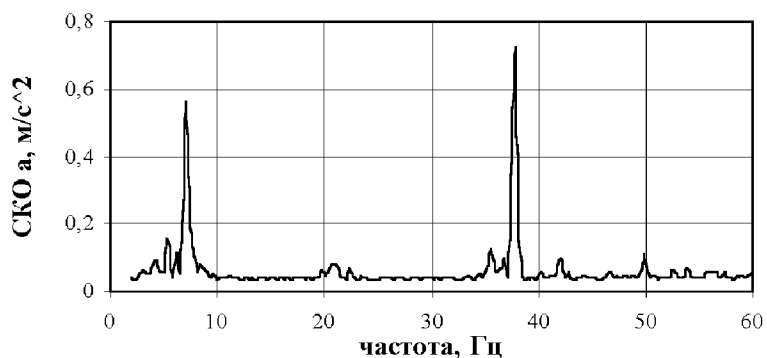


Рисунок 6 – SKO вертикальных ускорений, измеренных на раме тележки для скорости 70 км/ч

Для идентификации этих частот, рассмотрим графики СКО вертикальных ускорений, измеренных на раме тележки вагона типа ЕЖ-3 в метрополитене г. Харькова (рис. 6, 7).

Из рис. 6, 7 видно, что для спектра сигнала характерны подъемы уровней СКО вертикальных ускорений на частотах, близких к 7, 20 и 35 Гц, что обусловлено наличием резонансных режимов работы тележки на данных частотах. Это подтверждается экспериментальными данными, приведенными в работе [6] для тележек типа ЕЖ-3.

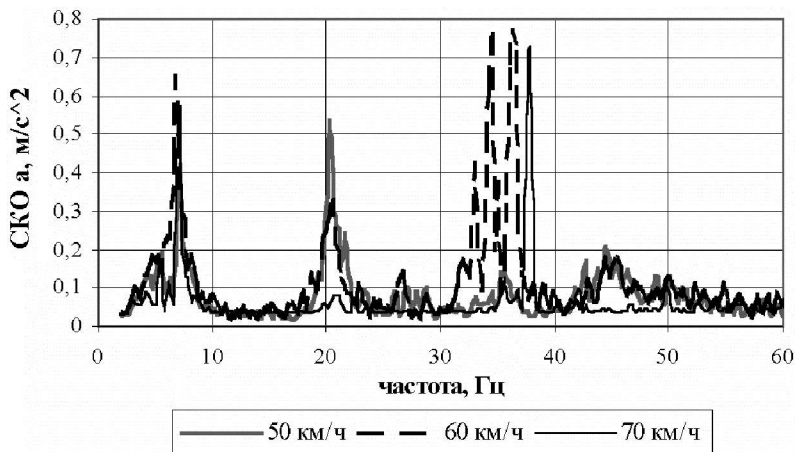


Рисунок 7 – СКО вертикальных ускорений, измеренных на раме тележки (общий вид)

### Выводы

1. Разработана методика виброизмерений рам тележек вагонов метрополитена в эксплуатационных условиях.

2. Проведена идентификация внешнего воздействия на рамы тележек, вызванного неровностями пути, которое необходимо для решения задачи случайных вынужденных колебаний.

3. Результаты экспериментальных исследований показали:

а) при увеличении скорости движения электропоезда с 50 до 70 км/ч наблюдается общее возрастание уровней спектральной плотности вертикальных ускорений буксовых узлов колесных пар рам тележек,

б) максимальные значения спектральной плотности вертикальных ускорений наблюдаются на одних и тех же частотах,

в) при увеличении скорости движения возрастание уровней спектральной плотности вертикальных ускорений, измеренных на раме тележки, не прослеживается на отдельных частотах, что можно объяснить малым количеством реализаций.

**Список литературы:** 1. Добровольская Э.М. Вагоны метрополитена типа Е. Устройство и обслуживание. – М: Транспорт, 1989. – 302 с. 2. Фадеев С.В., Сергеев А.А., Смирнов В.А. Комплекс диагностики колесно-редукторных блоков // Локомотив. – 2002. – №7. – С. 22-24. 3. Белоцерковский А.Б., Жовдак В.А., Смирнов М.М., Черных О.В., Яцько С.И. Разработка методики виброизмерений колесно-редукторных блоков вагонов метрополитена // Труды 7-й междунар. науч.-техн. конф. «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве», 28-29 мая 2003 г. – Харьков: ХНПК «ФЭД». – 2003. – С. 216-218. 4. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа – М.: Мир, 1983. – 312 с. 5. Механическая часть тягового подвижного состава: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / И.В. Бирюков, А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак и др. / Под ред. И.В. Бирюкова. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с. 6. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак, А.П. Матвеевичев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

*Поступила в редколлегию 20.12.2006*

УДК 621.01.001

**В.А.ЖОВДАК**, докт.техн.наук; **А.В.ТОРЯНИК**, НТУ «ХПИ»

## **СТАТИСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Описано алгоритм вирішення задачі статистичної динаміки для кінцево-елементних моделей конструкцій. Досліджено природу сейсмічних впливів і запропоновано способи їх моделювання з використанням імовірнісних підходів. Розроблено методичне й програмне забезпечення для дослідження динаміки фундаментів турбоустановок під впливом сейсмічного навантаження з урахуванням запізнення. Здійснено рішення задачі статистичної динаміки для моделі балки за допомогою розробленого алгоритму.

An algorithm of solving the problem of statistical dynamics of finite element models of constructions is described. The nature of seismic influences is investigated and methods of their modeling by means of probability approaches are proposed. There are developed methodical instructions and software to investigate the dynamics of turbo-installation foundations under seismic influence with delay. The problem of statistic dynamics of beam model is solved by the developed algorithm.

### **1. Введение. Актуальность проблемы**

Значительная часть территорий СНГ и зарубежья находится в области сейсмически опасных районов земной поверхности, являющихся неблагоприятными для расположения сооружений длительного срока службы. Однако в силу экономических причин этого избежать невозможно. Для уменьшения риска разрушения сооружений к их основаниям предъявляются специфические требования.

Чрезвычайную важность представляет расчет сооружений стратегических объектов таких, как энергетические турбоустановки, поскольку их частичное или полное разрушение приводит не только к огромным экономическим потерям, но и экологическим и людским жертвам.