



# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕБАНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К КОНСТРУКЦИИ АВТОНОМНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ТОКА

## STUDY OF VIBRATION CHARACTERISTICS OF RAILROAD FREIGHT CARS TO DETERMINE TECHNICAL DESIGN REQUIREMENTS TO SELF-CONTAINED PIEZOELECTRIC GENERATORS

УДК 621.311.69

И.Васильев<sup>1</sup>, С.Генералов<sup>2</sup>, О.Краснобаев<sup>3</sup>, А.Чуприн<sup>1</sup>  
I.Vasiliev<sup>1</sup>, S.Generalov<sup>2</sup>, O.Krasnobaev<sup>3</sup>, A.Chuprin<sup>1</sup>

Проведено исследование характеристик колебаний вагона-цистерны и полувагона универсального на разных участках железнодорожного пути. С помощью специального оборудования выполнены измерения частоты и ускорения колебаний в зависимости от скорости, загруженности и типа вагона. На основе результатов анализа полученных данных разработаны технические требования к пьезоэлектрическим генераторам тока, предназначенным для создания автономного источника питания грузовых вагонов и платформ.

The vibration characteristics of a tank wagon and universal gondola car in different sections of the railway track are studied. With the use of special equipment frequency and acceleration fluctuations depending on speed, load and type of cars are measured. Based on the analysis of the obtained data the requirements to piezoelectric generators for creation of self-contained power source for freight cars and goods trucks are developed.

**Р**оссийский железнодорожный транспорт играет важную роль при перевозке грузов и пассажиров: на его долю приходится 85% внутреннего грузооборота, а общая эксплуатационная длина железнодорожных путей составляет более 85 тыс. км [1]. Поэтому очень большое значение имеет проблема обеспечения безопасности подвижных составов. Одним из путей ее решения является использование беспроводных датчиков для получения необходимой информации о состоянии поезда (скорость движения, местоположение,

осевая нагрузка, состояние тормозной системы) и железнодорожных путей (стрелочные переводы, мосты) [2-5]. Учитывая отсутствие системы электропитания у грузовых вагонов, установка датчиков представляет собой непростую задачу. Применение электрических кабелей или гальванических элементов является сложным и дорогостоящим решением, а использование альтернативных источников энергии, таких как солнечная энергия или энергия ветра, ненадежно и не удовлетворяет прочностным требованиям. Потенциальным источником энергии для

<sup>1</sup> НПЦ "СпецЭлектронСистемы" / SpecElectronSystems RPC.

<sup>2</sup> НПК "Технологический центр" / Technology center RPC.

<sup>3</sup> ВНИИЖТ / VNIIZhT.

железнодорожного транспорта являются механические вибрации. Учитывая снижение потребляемой мощности интегральных схем и появление маломощных беспроводных устройств, энергии колебания грузового вагона при движении поезда достаточно для обеспечения электропитанием комплекса беспроводных датчиков [3, 6, 7].

На сегодняшний день существует три основных типа электромеханических преобразователей: пьезоэлектрический [8], электростатический [9, 10] и электромагнитный [11, 12]. Исходя из условий эксплуатации подвижного состава, для железнодорожного транспорта наиболее подходящими являются пьезоэлектрические генераторы. Они способны эффективно преобразовывать энергию механических вибраций в электроэнергию при малых величинах ускорения и частотах внешнего воздействия, не требуя при этом дополнительных источников питания [13].

Для эффективного сбора энергии механических вибраций в первую очередь необходимо исследовать параметры колебаний железнодорожного состава, однако на данный момент в научной литературе отсутствует информация относительно характеристик колебаний грузовых вагонов и платформ, используемых на территории России. Основная задача заключается в определении частотного диапазона, в котором возникают колебания с наибольшим ускорением. В данной статье приведены результаты исследования вертикальных и горизонтальных колебаний подвижного состава для разных типов вагонов на различных участках Московской железной дороги. На основе полученных данных определен частотный диапазон, в котором наблюдаются наибольшие значения ускорений, проведен анализ параметров колебаний железнодорожного состава в зависимости от типа вагона, его загруженности и скорости, определены пиковые значения ускорений на разных участках пути. Полученные результаты использованы в качестве исходных данных при разработке предварительных технических требований для пьезоэлектрических генераторов тока.

### **ВЕРТИКАЛЬНЫЕ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ УСКОРЕНИЯ КУЗОВА ГРУЗОВОГО ВАГОНА**

Железнодорожный путь и подвижной состав, в частности вагон, представляют единую механическую систему, в которой они взаимодействуют, находясь в зависимости друг от друга. В реальных условиях рельсы и колеса имеют неровности на поверхности катания, а также некоторые другие технические особенности (кривизна пути, коничность поверхности

катания колес и др.), в результате чего в элементах пути и подвижного состава возникают различные колебания, а между ними – динамические силы взаимодействия.

Динамические силы, отклонения от положения равновесия, инерционные перегрузки, возникающие при движении вагона в составе поезда, являются следствием колебательных процессов и других видов неравномерного движения инерционных масс, составляющих рассматриваемую механическую систему. Величины и частоты колебаний определяют динамические качества вагона: плавность хода, устойчивость движения, а также величины сил, от которых зависит прочность элементов вагона и железнодорожного пути.

С точки зрения механики вагон состоит из физических тел и связей между ними [14]. Свободное твердое тело, на которое не наложены связи, имеет шесть степеней свободы, поэтому, наряду с поступательным движением вагона вдоль пути, рассматривается перемещение его кузова и тележки вследствие колебаний.

Как принято в теоретической механике, различают собственные и вынужденные колебания вагона. Первые возникают в системе, выведенной из состояния равновесия какой-либо причиной и мгновенно освобожденной или выведенной из состояния покоя толчком. Такие колебания постепенно затухают. Вторые возникают и непрерывно поддерживаются под действием какого-либо источника возмущения в течение рассматриваемого промежутка времени.

Для изучения колебаний вагона применяют теоретико-экспериментальный метод: теоретически устанавливают общие зависимости между колебаниями, силами и напряжениями, возникающими в системе "вагон-путь" с учетом конструктивных параметров и условий движения, а экспериментально определяют конкретные значения этих параметров, устанавливают законы статической повторяемости результатов, имеющих вероятностную природу. Теоретические методы базируются на теоремах и уравнениях аналитической и технической механики.

В нашем случае рассматриваются основные колебания кузова вагона – вертикальные и горизонтальные (поперечные) – при движении с различными скоростями. Для определения параметров вертикальных и горизонтальных (поперечных) колебаний кузова в ходе поездок с грузовыми вагонами на различных участках пути регистрировались величины вертикальных и горизонтальных ускорений.



Проведенные измерения показали, что в эксплуатации уровень вертикальных ускорений превышает уровень горизонтальных, а также меньше зависит от профиля пути, то есть практически не меняет своего значения и вида (не имеет статическую составляющую в кривых участках пути). В связи с этим далее будем рассматривать вертикальные ускорения на кузове грузового вагона как в порожнем, так и в груженом состоянии при различных скоростях движения.

В качестве оценочных принимаем следующие показатели:

- максимально возможный уровень ускорения;
- основной уровень амплитуды ускорений (квантиль 95%);
- частота основного уровня ускорений.

### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Первый объект исследования – вагон-цистерна на тележках модели 18-100. Данный тип вагона был выбран как наиболее неблагоприятный с точки зрения динамического поведения, так как вагоны-цистерны имеют высокий центр тяжести.

Второй объект исследования – полувагон универсальный на тележках модели 18-9855. Данный тип вагона выбран как наиболее массовый вид подвижного состава. Универсальные полувагоны предназначены для перевозки большой номенклатуры грузов, не требующих защиты от атмосферных осадков: насыпных непылевидных, навалочных, штабельных и тарно-штучных.

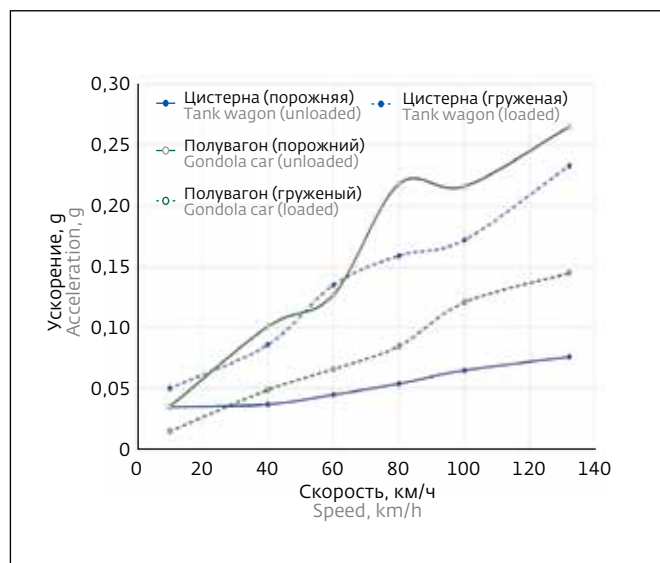


Рис.1. Зависимость вертикальных ускорений от скорости  
Fig.1. Dependence of vertical accelerations on speed

Регистрация величин вертикальных и горизонтальных ускорений проводилась при поездках на различных участках Московской железной дороги. Конструкция верхнего строения пути: путь звеньевой и бесстыковой, рельсы Р65, шпалы железобетонные, рельсовые скрепления АРС, КБ, ЖБР и КД. Текущее состояние пути на измерительных участках оценивается по ширине колеи, рихтовке, перекосам и по уровню в соответствии с требованиями инструкции ЦП-515 по результатам прохода вагона-путеизмерителя. На измерительном стрелочном переводе состояние по геометрии рельсовой колеи оценивается в соответствии с требованиями "Инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути ЦП-774" с помощью путевого шаблона ЦУП-2.

Аппаратура, регистрирующая динамические показатели вагона, располагается в вагоне-лаборатории опытного поезда, а аппаратура, регистрирующая показатели воздействия вагона на путь и стрелочные переводы, располагается в измерительных модулях, либо в вагоне-лаборатории, стационарно установленных вблизи измеряемых участков пути.

Основным средством регистрации данных в испытаниях являлся тензометрический усилитель Spider-8 (НВМ, Германия). Регистрация данных осуществлялась портативным компьютером с установленной специализированной программой сбора и обработки данных. Для измерения ускорений использовались акселерометры типа В12/500 с диапазоном измерений  $\pm 100$  g. Оцифровка велась с частотой 200 Гц и фильтром низких частот 20 Гц.

Весь измерительно-регистрирующий комплекс аттестован по принятой в РФ технологии и прошел поверку.

### АНАЛИЗ УСКОРЕНИЙ

Как видно из рис.1, уровень вертикальных ускорений зависит от типа подвижного состава (конструкции и типа тележек), а также от загруженности, причем у груженой цистерны уровень ускорений больше, чем у порожней, а у полувагона наоборот.

Минимальные вертикальные ускорения равны 0,015 g на маневровой скорости 10 км/ч, однако при проходе стрелочных переводов (рис.2) возникают одиночные выбросы ускорений, превышающие основной уровень в три и более раз.

На эксплуатационной скорости (80 км/ч) минимальные ускорения равны 0,054 g, а максимальные – 0,22 g. Одиночные всплески ускорений, возникающие от стыков и дефектов пути, могут превышать 0,8 g.

Максимальные ускорения во время эксплуатации возникают при соударениях вагонов на горке.

Таблица 1. Амплитуды (квантиль 95%) частоты наибольших возмущений колебания

Table 1. Amplitudes of frequency (95% quantile) of the highest perturbation of vibration

Скорость, км/ч Speed, km/h	Параметр Parameter	Тип вагона Type of railcar			
		Вагон-цистерна на тележках модели 18-100 Tank wagon, 18-100 bogie		Полувагон на тележках модели 18-9855 Gondola car, 18-9855 bogie	
		порожний unloaded	груженный loaded	порожний unloaded	груженный loaded
10	A, g	0,035	0,05	0,035	0,015
	$F_{\text{пик}}$ , Гц $F_{\text{peak}}$ , Hz	7-9,5	5,5-9,5	12,5-15	6-7
60	A, g	0,045	0,135	0,127	0,066
	$F_{\text{пик}}$ , Гц $F_{\text{peak}}$ , Hz	5,6; 8,5; 10	5,6	9,5-12,5; 5,6	5,6
80	A, g	0,054	0,159	0,218	0,085
	$F_{\text{пик}}$ , Гц $F_{\text{peak}}$ , Hz	7,5	7,5	7,5; 12,5-13,5	3-4; 7,5
100	A, g	0,065	0,172	0,216	0,121
	$F_{\text{пик}}$ , Гц $F_{\text{peak}}$ , Hz	9,5	9,5	9,5	2-6
132	A, g	0,076	0,233	0,265	0,145
	$F_{\text{пик}}$ , Гц $F_{\text{peak}}$ , Hz	12,1; 3-8	3-7; 12,1	12,1	3-7

Согласно "Нормам для расчета и проектирования новых и модернизированных вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)" все подвагонное оборудование должно выдерживать 4 g.

Частоты колебаний грузовых вагонов лежат в пределах 1,5-18 Гц. Некоторые значения прямо пропорциональны скорости движения (зависят от взаимодействия колеса и рельса, колебания на рессорах). Так пиковая амплитуда при 60 км/ч находится на частоте около 5,6 Гц, а при скорости около 135 км/ч - на частоте 12,1 Гц.

Результаты обработки и анализа данных представлены в табл.1. Как видно из табл.1, ускорения при колебаниях отличаются для разных конструкций вагонов в зависимости от их нагрузки, что объясняется разной высотой центра тяжести системы в целом.

Анализ полученных данных полностью подтверждает теоретические представления о колебательных процессах в системе "вагон-железнодорожное полотно":

- с увеличением скорости вагона увеличивается частота колебаний;
- с увеличением скорости вагона увеличивается ускорение колебаний;
- разница между груженым и порожним вагоном не является существенной, так как полная масса меняется не более чем в два раза.

### РАЗРАБОТКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРАМ ТОКА ДЛЯ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ И ПЛАТФОРМ

Основываясь на результатах исследований характеристик колебаний подвижного состава железных дорог, можно сформулировать основные требования к конструкции пьезоэлектрических генераторов тока. Так как наибольшие колебания вагонов (0,015-0,27 g) происходят в частотном диапазоне 1,5-18 Гц, то необходимо разработать низкочастотную конструкцию пьезогенератора, способную функционировать на малых ускорениях. Для удовлетворения представленных требований подойдут пьезогенераторы, работающие на изгибных механических деформациях. К ним относятся мембранные и балочные пьезогенераторы, которые могут производить большие механические напряжения при малых частотах и ускорениях внешних воздействий. Кроме того, для достижения большей эффективности пьезоэлементы генератора могут быть настроены на несколько разных резонансных частот с помощью дополнительных грузов разной массы. Плотность мощности таких пьезогенераторов - более 0,2 мВт/см<sup>3</sup> [15] - достаточна для обеспечения контроля местоположения и состояния вагона.

Грузовые вагоны могут длительное время пребывать в неподвижном состоянии, находясь на стоянке, в погрузочно-разгрузочных пунктах, сортировочных

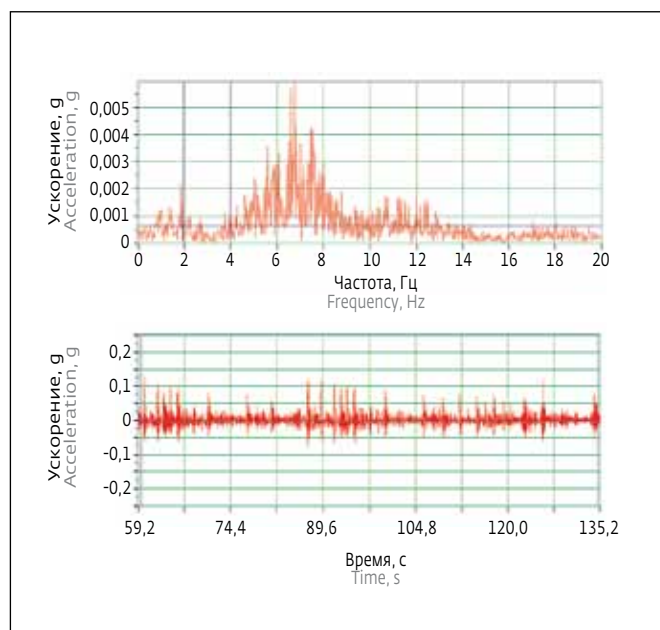


Рис. 2. Вибрации порожней цистерны на скорости 40 км/ч при прохождении стрелочных переводов

Fig. 2. Vibration of unloaded tank wagon at a speed of 40 km/h when passing switches

центрах и т.д. Поэтому во время движения пьезогенератор должен накопить достаточное количество энергии, чтобы обеспечить работоспособность датчиков во время стоянки. Для этого требуется аккумулятор, способный эффективно сохранять накопленную энергию в течение длительного времени и обладающий большим сроком службы. Как правило, для этих целей применяются никель-кадмиевые аккумуляторы (Ni-Cd) ввиду их низкого уровня саморазряда, широкого рабочего температурного диапазона и большого числа циклов перезарядки. Срок службы современных промышленных никель-кадмиевых аккумулято-

ров превышает 15 лет [16]. Для эффективной зарядки аккумулятора выходное напряжение пьезогенератора должно находиться в диапазоне 1-7 В.

Во время движения поезда из-за наличия дефектов пути и соударения вагонов возможны значительные перегрузки, поэтому конструкция пьезогенератора должна выдерживать механические удары с перегрузкой в 10 g. Температурный режим работы пьезогенератора должен соответствовать условиям использования железнодорожного транспорта (-40...60°C).

Учитывая описанные особенности, можно сформулировать основные требования к разрабатываемому пьезоэлектрическому генератору тока (табл. 2).

Работа выполнена в ЗАО "НПЦ СпецЭлектронСистемы" совместно с ОАО "НИИЖТ" и ПНК "Технологический центр" при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения REMEF1579X0086 (№ 14.579.21.0086).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Состояние основных фондов путевой инфраструктуры [Электронный ресурс] // ОАО "РЖД" [Официальный сайт]. URL: [http://rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=5127&layer\\_id=3290&id=3633](http://rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=5127&layer_id=3290&id=3633) (дата обращения: 16.11.2015).
2. Peigney M., Dominique Siegert. Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced bridge vibrations // Smart Mater. Struct. 2013. Vol. 22. P. 1-11.
3. Tianchen Y., Jian Y., Ruigang S., Xiaowei L. Vibration energy harvesting system for railroad safety based on running vehicles // Smart Mater. Struct. 2014. Vol. 23. P. 1-14.
4. Hada A., Soga K., Liu R., Wassell I.J. Lagrangian heuristic method for the wireless sensor network design problem in railway structural health monitoring // Mech. Syst. Signal Pr. 2012. Vol. 28. P. 20-35.

Таблица 2. Основные требования к разрабатываемому пьезоэлектрическому генератору тока

Table 2. Basic requirements to developed piezoelectric generator of current

Рабочий диапазон внешних воздействий, Гц Working range of external impacts, Hz	1-20
Рабочие ускорения, g Working acceleration, g	От 0,02
Мощность, выделяемая пьезоэлектрическим генератором тока 1 дм <sup>3</sup> при вибрации в полосе частот 1-20 Гц и ускорении 0,02-1,5 g, мВт Power of piezoelectric generator of 1 dm <sup>3</sup> at vibration in the frequency range of 1-20 Hz and acceleration of 0.02-1.5 g, mW	0,25-1,2
Энергия, накапливаемая пьезоэлектрическим генератором тока 1 дм <sup>3</sup> за 100 с, Дж Energy generated by the piezoelectric generator of 1 dm <sup>3</sup> for 100 s, J	0,05-0,10
Электрическое напряжение на выходе пьезоэлектрического генератора тока, В Output voltage of piezoelectric generator, V	1-7



5. Li P., Gu H., Song G. et al. Concrete structural health monitoring using piezoceramic-based wireless sensor networks // *Smart Struct. Syst.* 2010. Vol. 6. P. 731-48.
6. Song H.J., Choi Y.T., Wang G., Wereley N.M. Energy Harvesting Utilizing Single Crystal PMN-PT Material and Application to a Self-Powered Accelerometer // *Journal of Mechanical Design.* 2009. Vol. 131. P. 1-8.
7. Zuo L., Tang X. Large-scale vibration energy harvesting // *J. of Intelligent Material Systems and Structures.* 2013. Vol. 24, № 11. P. 1405-30.
8. Wang Jianjun, Zhifei Shi, Hongjun Xiang, Gangbing Song. Modeling on energy harvesting from a railway system using piezoelectric transducers // *Smart Mater. Struct.* 2015. Vol. 24. P. 1-13.
9. Torres E.O., Rincon-Mora G.A. Electrostatic energy-harvesting and battery-charging CMOS system prototype // *IEEE Trans. Circuits Syst.* 2009. Vol. 56. P. 1938-48.
10. Lallart M., Pruvost S., Guyomar D. Electrostatic energy harvesting enhancement using variable equivalent permittivity // *Phys. Lett. A.* 2011. Vol. 375. P. 3921-4.
11. Wang J.J., Penamalli G., Zuo L. Electromagnetic energy harvesting from train induced railway track vibrations // *ASME Int. Conf. on Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA).* 2012. P. 29-34.
12. Pourghodrat A., Nelson C.A., Phillips K.J., Fateh M. Improving an energy harvesting device for railroad safety applications // *Proc. of SPIE.* 2011. Vol. 7977. P. 1-9.
13. Roundy S., Wright P.K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics // *SmartMater. Struct.* 2004. Vol. 13. P. 1131-42.
14. Wanming Zhai, Kaiyun Wang, Chengbiao Cai. Fundamentals of vehicle-track coupled dynamics // *Vehicle System Dynamics.* 2009. Vol. 47. N 11. P. 1349-76.
15. David F. Berdy et al. Low-Frequency Meandering Piezoelectric Vibration Energy Harvester // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.* 2012. Vol. 59, N 5. P. 846-58.
16. Промышленные аккумуляторные батареи [Электронный ресурс] // ООО "Курский аккумуляторный завод" [Официальный сайт]. URL: <http://www.akbkursk.ru/catalogue/industrial/8/> (дата обращения: 19.11.2015).