РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ТОКА ДЛЯ НАВИГАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

DEVELOPMENT OF A PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER FOR NAVIGATION SUPPORT OF RAILWAY TRANSPORT

УДК 621.311.69

И.Васильев*, А.Чуприн* / vasilev137@gmail.com
I.Vasiliev*, A.Chuprin*

Исследованы параметры колебаний разных типов грузовых вагонов. Предложено несколько конструкций пьезогенераторов для эффективного преобразования механических колебаний в электроэнергию. На основе экспериментальных данных проведено сравнение разных типов и конструкций пьезогенераторов. Оценено количество энергии, необходимое для работы устройства приема-передачи информации. Полученные данные могут быть использованы для разработки пьезоэлектрического генератора тока, предназначенного для обеспечения автономным питанием грузовых вагонов и платформ.

Investigation of vibration parameters of the freight cars is presented. Several designs of piezoelectric energy harvester are proposed for the efficient conversion of mechanical vibrations into electrical power. Based on experimental studies a comparison of different types and designs of energy harvester is performed. The amount of energy required for wireless transceiver for monitoring location of a vehicle is evaluated. Obtained data can be used for development of production technology of the piezoelectric energy harvester to provide autonomous power supply for freight cars.

В целях оптимизации работы системы железнодорожного транспорта актуальна задача создания единой информационной системы, которая обеспечит следующие преимущества:

- реализацию в полном объеме функции автоматизированного контроля состава поездов, а также уменьшение штата сотрудников, контролирующих составы поездов;
- внедрение безбумажных информационных технологий;
- повышение достоверности и оперативности отчетности о состоянии вагонных и локомотивных парков;
- высокий уровень информационного сервиса во внутренних и транзитных международных перевозках.

Для этого необходимо оснастить каждую подвижную единицу железнодорожного транспорта набором датчиков, которые способны отслеживать ее параметры и отправлять полученные сведения в центр обработки данных. Основной проблемой при реализации такой идеи является отсутствие системы электропитания на грузовых вагонах. Применение электрических кабелей или гальванических элементов – сложное и дорогостоящее решение [1], поэтому одним из перспективных направлений является использование солнечной, ветряной, тепловой или механической энергии [2]. Основным критерием выбора системы, применяемой в качестве автономного источника энергии, является возможность работы в условиях эксплуатации железнодорожного транс-

* НПЦ "СпецЭлектронСистемы" / SpecElectronSystems RPC.

порта. Несмотря на простую структуру солнечных элементов, для них характерно снижение накапливаемой энергии в темное время суток, а также деградация оптических характеристик при загрязнении поверхности элемента [3]. Термогенераторы имеют малые размеры и продолжительный срок эксплуатации, однако для их эффективной работы необходима большая разность температур [4]. Ветрогенератор преобразует энергию потока воздуха в электроэнергию, но при малых размерах турбины характеризуется сложностью конструкции и низкой производительностью [5]. Автономные генераторы тока на основе пьезоэлектрического эффекта отвечают прочностным требованиям и способны эффективно работать в широких диапазонах температур и влажности, а также выдерживать вибрации и механические удары, возникающие при движении поезда [6–9].

Для обеспечения максимально эффективного преобразования механической энергии вибраций целесообразно провести исследования колебаний грузовых вагонов и определить частотный диапазон с наибольшими значениями ускорений. Экспериментальное сравнение разных типов пьезогенераторов позволит сделать заключение о возможности создания автономного источника питания для обеспечения навигационной поддержки на железнодорожном транспорте.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Исследования проводились на различных участках Московской железной дороги на следующих типах вагонов:

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

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

Основным средством регистрации данных являлся тензометрический усилитель Spider-8 (НВМ, Германия). Регистрация осуществлялась с помощью компьютера с установленным специ-

In order to optimize the operation of the railway system it's necessary to create a unified information system that will provide:

- implementation of automated control of the trains, as well as a reduction in staff controlling the train;
- introduction of paperless information technology;
- increase the reliability and efficiency of reporting on the car and locomotive fleet;
- high level of information services in domestic and international transit traffic.

To achieve this it's necessary to equip each mobile unit of railway transport with a set of sensors, which can monitor the required parameters and send their to the data center. The main problem for implementation of this idea is the

lack of power supply system on freight cars. Application of electric cables or galvanic cells is a complex and costly solution to the problem [1]. Thus one of the promising directions is the use of alternative sources of energy based on solar, wind, thermal or mechanical energy [2]. The main requirement to the system used as an autonomous power source, is the ability to work under railway transport conditions. In spite of the simple structure of solar cells, their main disadvantage is the reduction of the accumulated energy in the dark as well as the degradation of the optical characteristics due surface contamination of the element [3]. Thermoelectric generators produce electricity based on temperature difference, and have small volumes and long service

life. However, their efficient operation requires a large temperature difference [4]. Wind turbine converts the energy of airflow into electric energy. Its main drawback is the complexity of the design and, as a result, performance degradation with decreasing of the turbine size [5]. Autonomous power generators based on the piezoelectric effect can satisfy strength requirements, operate effectively in a wide temperature range and presence of moisture, withstand vibration and mechanical shock arising during the motion of the train [6–9].

In this project for the most efficient conversion of mechanical energy to electricity the vibration parameters of freight cars were studied and the frequency band with the highest values

Рис.1. Вертикальные колебания грузовых вагонов

Fig.1. Vertical acceleration of the freight cars

ализированным программным обеспечением для сбора и обработки данных. Для измерения ускорений использовались акселерометры типа B12/500 с диапазоном измерений $\pm 100g$. Оцифровка велась с частотой 200 Гц и фильтром низких частот 20 Гц. Весь измерительно-регистрирующий комплекс был аттестован по принятой в РФ технологии и прошел поверку.

Как видно из рис.1, уровень вертикальных ускорений зависит от типа подвижного состава (конструкции и типа тележек), а также загруженности,

Рис.2. Пьезоэлектрические элементы: а – мембранный элемент; б – балочный элемент

Fig.2. Piezoelectric elements: a – membrane element; b – beam element

причем у груженой цистерны уровень ускорений больше, чем у порожней, а у полувагона наоборот.

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

На эксплуатационной скорости (80 км/ч) минимальные ускорения равны 0,054g, а максимальные – 0,22g. Одиночные всплески ускорений, возни-

of accelerations is determined. Experimental study and comparison of various types of piezoelectric generators demonstrate the possibility of creating an autonomous source of power for navigation support of railway transport.

STUDY OF THE VIBRATION PARAMETERS OF FREIGHT CARS

The studies were conducted at different parts of the Moscow railway on following types of cars:

- tank car with the bogie model 18-100. This type of car chosen due to its high center of gravity and the most unfavorable dynamic behavior.

- gondola car with the bogie model 18-9855. This type of car was chosen as the most popular type of rolling stock. Gondola cars are designed to carry a large range of goods that don't require protection from the weather.

Equipment recording the dynamic performance of the car located in the car-laboratory which is the part of the train; equipment recording the impact indicators of the car on track and turnouts located in the measuring units installed near measuring sections of rail.

The main measuring device for recording data is a strain

gauge amplifier Spider-8 (HBM, Germany). Data recording was performed using computer with specialized data collection and processing program. For acceleration measurement used accelerometers B12/500 with measuring range $\pm 100g$. Digitization conducted with a frequency of 200 Hz and a low pass filter of 20 Hz. All measuring and recording equipment is certified by technology adopted in Russian Federation.

As can be seen from Fig.1, vertical accelerations depend on the type of rolling stock (type and design of bogie) as well as load. Acceleration level of the

кающие от стыков и дефектов пути, могут достигать 0,8g и более.

Частоты колебаний лежат в пределах 1,5–18 Гц. Имеются частоты, напрямую зависящие от скорости движения (от взаимодействия колеса и рельса, колебания на рессорах), например, пиковая амплитуда при 60 км/ч находится на частоте около 5,6 Гц, а при 135 км/ч – на 12,1 Гц.

Анализ полученных данных позволяет сделать выводы, которые полностью подтверждают теоретические представления о колебательных процессах в системе "вагон – железнодорожное полотно":

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

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ТОКА

Исходя из параметров колебаний подвижного состава, были выбраны два типа пьезоэлементов, которые позволяют наиболее эффективно преобразовывать энергию механических колебаний в электрическую: балочный и мембранный. Для проведения экспериментальных исследований в качестве балочного образца использовался пьезоэлемент V25W фирмы Mide Technology, а в качестве мембранного – ПБ 100×0,51 (рис.2). Для подстройки собственной частоты под частоту вынуждающей силы на пьезоэлемент устанавливались дополнительные грузы разной массы. Выпрямление электрического

Рис.3. Электронная схема обработки сигнала с пьезоэлемента

Fig.3. Rectifying electrical circuit

сигнала с пьезоэлемента осуществлялось с помощью электронной схемы, представленной на рис.3.

Измерения проводились на электродинамической вибрационной установке V650 НРАК-СЕ. Чтобы обеспечить прогиб пьезоэлемента во время воздействия внешних вибраций, для каждого типа пьезоэлементов была изготовлена специальная оснастка.

Экспериментальные исследования балочного пьезогенератора проводились при параметрах внешнего воздействия, приведенных в таблице. Для ряда резисторов с электрическим сопротивлением из

loaded tank car greater than the empty, and the opposite situation observed for gondola. The minimum vertical acceleration equal to 0.015g at a speed of 10 km/h (corresponding to shunting speed), but when the train passing through turnouts single acceleration peaks occur, which exceed the basic level in more than 3 times. At operational speed (80 km/h) minimum acceleration level equal to 0.054g and maximum level is 0.22g. Single peaks of acceleration arising from the joints and track defects can reach more than 0.8g.

The oscillation frequencies of freight cars are in the range

of 1.5–18 Hz. Some frequencies directly related to train speed (interaction of the wheel and the rail, spring oscillation). For example, the peak amplitude at 60 km/h is 5.6 Hz and at 135 km/h – 12.1 Hz.

Processing and analysis of the obtained data fully confirm the theoretical concepts of oscillatory processes in the system car-track and can be summarized as:

- oscillation frequency and acceleration increase with increasing of car speed;
- difference between load and empty car is not essential as the total car weight varies no more than twice.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER

Based on the vibration parameters of the rolling stock, beam and membrane types of piezoelectric elements were selected which provide the most efficient conversion of mechanical energy into electrical oscillations. In experimental studies V25W beam piezoelectric element from Mide Technology Corp. and PB 100 × 0.51 membrane piezoelectric elements were used (Fig.2) [10]. To adjust the natural frequency to the frequency of the exciting force additional loads of different mass were installed to the piezoelectric

Рис.4. Упрощенный вид конструкции балочного пьезогенератора
Fig. 4. Simplified design of the beam piezoelectric energy harvester

Рис.5. Конструкция мембранного пьезоэлемента
Fig.5. Design of membrane piezoelectric energy harvester

диапазона 10–1000 кОм были измерены значения выходного напряжения и мощности пьезогенератора (рис.6).

Чтобы оценить возможность использования пьезогенератора в качестве автономного источника питания для обеспечения навигационной поддержки на железнодорожном транспорте, был проведен расчет количества энергии, необходимого для работы устройства приема-передачи данных, состоящего из GPS-модуля Jupiter SE868-AS и GSM/GPRS-модуля GL865-DUAL фирмы Telit. Предполагалось, что на каж-

дом вагоне установлен пьезогенератор, состоящий из 100 балочных пьезоэлементов. Выходная мощность каждого пьезоэлемента, исходя из экспериментальных данных, принималась равной 3,5 мВт. Во время движения поезда ведется постоянное отслеживание местоположения вагона, а во время стоянки GPS-модуль находится в режиме периодического отслеживания (12 с – ожидание, 3 с – работа). Данные с вагона передаются в сервисный центр по GSM/GPRS-каналу один раз в 5 мин при движении состава и один раз в 15 мин во время стоянки. Чтобы

element. Rectifying of the electrical signal from the piezoelectric element was performed with the help of the electronic circuit shown in Fig.3.

The measurements were executed on an electrodynamic vibration system V650 HPAK-CE. A special rig was made for each type of piezoelectric elements for the deflection of piezo element during the action of external vibrations.

Experimental studies of beam piezoelectric energy harvester were carried out at parameters of exciting force, given in Table. Output voltage and power of

piezo generator were measured for a number of resistors with electric resistance in the range 10–1000 Ohm (Fig.6).

In order to evaluate the possibility of using piezoelectric generator as an autonomous power supply to provide navigation support for railway transport, the amount of energy required for operation of the transceiver was calculated. The transceiver consist of GPS module Jupiter SE868-AS [11] and GSM/GPRS module GL865-DUAL [12] from Telit Company. It was assumed that each car has piezo generator consisting of 100 piezoelectric

beam elements. Based on experimental data the output power of each piezo element is assumed to be 3.5 mW. Location tracking of the car is constantly monitored during movement of the train, and GPS module works in a periodic mode (asleep for 12 s, then awake 3 s) during parking. Data are transmitted from the cars to a service center for GSM / GPRS channel once every 5 minutes during movement of rolling stock and once every 15 minutes during parking. Taking into account the possible loss in the conversion of energy from the piezoelectric element, during charging and

Рис.6. Напряжение и мощность на выходе балочного (а, с) и мембранного (b, d) пьезоэлементов в зависимости от нагрузочного сопротивления

Fig.6. Output voltage and power of beam (a, c) and membrane (b, d) piezoelectric energy harvester depending on the load resistance

учесть возможные потери при преобразовании энергии с пьезоэлемента, а также зарядке и саморазряде аккумулятора, полезная доля энергии принима-

лась равной 60% от изначально полученной с пьезоэлемента. В худшем случае, когда вагон находится в простое 80% времени, балочный пьезогенератор спо-

self-discharge of the battery, the proportion of useful energy was assumed to be 60% of the energy initially obtained from the piezoelectric element. According to the results of analysis, in the worst case, when the car is idle 80% of the total time, beam piezoelectric generator able to harvest 104% of the amount of energy required for operation of the transceiver.

To increase the output power a special design of beam piezo generator is proposed, which allows accumulate energy not only from vertical but also from horizontal vibration of the car. Piezoelectric elements placed on a special

holder in three spatial dimensions (Fig.4). Additional features of this design are more compact arrangement and, as a consequence, increase the power density of piezo generator [13].

The parameters of exciting force during the experimental studies of the membrane piezoelectric energy harvester are shown in Table. To reduce the initially high natural frequency of the piezoelectric element (500 Hz) a special design was used (Fig.5). The presence of the spring between the piezoelectric element and the load can significantly reduce the

natural frequency of the whole system depending on the stiffness coefficient and geometric dimensions of the spring. Furthermore, this design allows registering both vertical and horizontal mechanical vibrations. The measurement results for the different springs are shown in Fig.5. For comparison, measurements of loaded piezoelectric element without the spring were made. As seen from the graphs, the output power of the membrane piezo generator increases with the use of springs with a low stiffness coefficient (spring number 1, 2), and decrease with

Параметры внешнего воздействия
Parameters of exciting force

Параметр Parameter	Балочный пьезоэлемент Beam piezo element	Мембранный пьезоэлемент Membrane piezo element
Частота колеба- ний, Гц Oscillation fre- quency, Hz	8,7	15
Ускорение, g Acceleration	0,21	0,5
Масса добавоч- ного груза, г Mass of additional load, g	50	250

собен выработать 104% от количества энергии, необходимого для работы устройства приема-передачи данных.

Для увеличения выходной мощности балочного пьезогенератора предложена конструкция, которая позволяет регистрировать не только вертикальные, но и горизонтальные колебания вагона. Для этого пьезоэлементы располагаются на специальном держателе в трех пространственных измерениях (рис.4). Дополнительной особенностью такого расположения является более плотная компоновка и, как следствие, увеличение плотности мощности пьезогенератора.

Параметры внешнего воздействия при проведении экспериментальных исследований мембранного пьезоэлемента приведены в таблице. Для уменьшения изначально высокой собственной частоты

пьезоэлемента (500 Гц) использовалась конструкция, представленная на рис.5. Наличие пружины между пьезоэлементом и грузом позволяет значительно снизить собственную частоту всей системы в зависимости от коэффициента жесткости и геометрических размеров пружины. Кроме того, такая конструкция позволяет регистрировать как вертикальные, так и горизонтальные механические колебания. Результаты измерений для разных пружин представлены на рис.6. Для сравнения были проведены измерения пьезоэлемента с грузом без пружины. Как видно из графиков, выходная мощность мембранного пьезогенератора увеличивается при использовании пружин с малым коэффициентом жесткости (пружины № 1, 2), и, по мере увеличения жесткости (пружины № 3, 4), уменьшается до значения, получаемого в случае отсутствия пружины.

Малые значения выходной мощности мембранного пьезогенератора относительно балочного обусловлены особенностями первого. Для достижения больших значений выходной мощности необходимо изготовить пьезоэлемент с менее жестким металлическим основанием и двумя слоями пьезокерамики. Однако полученные данные позволяют качественно сравнивать эффективность разных конструкций пьезогенераторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложены основные этапы разработки пьезоэлектрического генератора тока, предназначенного для обеспечения автономным электропитанием грузовых вагонов и платформ с целью навигационной

the high stiffness coefficient (spring number 3, 4). With the increasing of spring stiffness coefficient the output power of piezo generator is reduced to the value obtained in the absence of the spring.

Low output power of the membrane piezo generator compared to the beam piezo generator caused by features of the membrane piezoelectric elements (rigid metal base, single layer of piezoelectric ceramic). However, the obtained data allow to qualitatively compare the effectiveness of different designs piezoelectric energy harvesters.

CONCLUSIONS

To date, the use of satellite technology to provide navigation support for railway transport is complicated due to the lack of power supply of freight cars. In this paper investigated the vibration parameters of the rolling stock and proposed designs of the beam and membrane piezoelectric energy harvesters for the most efficient conversion of mechanical vibrations into electrical energy. Based on the data analysis, the freight cars are experiencing fluctuations in the frequency range 1.5–18 Hz and the average values of the acceleration are 0.015–0.27g. The maximum

output power of the investigated piezoelectric energy harvester is 3.5 mW per one piezo element. In case of placement on each car 100 piezoelectric elements the generated energy obtained by moving of the car is sufficient for operation of the transceiver, even if 80% of the total time the car is idle. Presented results confirm the possibility of using the piezoelectric energy harvester as an autonomous power supply for freight cars. ■

The project supported by Ministry of Education and Science of the Russian Federation (agreement No. 14.579.21.0086 dated 11.21.2014).

поддержки железнодорожной инфраструктуры. Проведено исследование параметров колебаний разных типов грузовых вагонов, на основе которого определены частотный диапазон и характерные значения ускорений. Исходя из полученных данных рассмотрены наиболее подходящие типы пьезоэлементов и предложены конструкции пьезогенераторов на их основе. Экспериментальные исследования пьезогенераторов показывают возможность накопления достаточного количества электроэнергии для определения местоположения железнодорожного транспорта и передачи информации в сервисный центр.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 14.579.21.0086 от 21.11.2014 г.)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Grudén M.** et al. Field operational testing for safety improvement of freight trains using wireless monitoring by sensor network // IET Wirel. Sens. Syst. 2014. Vol. 4, N 2. P. 54–60.
2. **Tuna G., Gungor V.C.** Energy harvesting and battery technologies for powering wireless sensor networks // Industrial Wireless Sensor Networks. WP, 2016. Cp. 2. P. 25–38.
3. **Win K.K.** et al. Efficient Solar Energy Harvester for Wireless Sensor Nodes // IEEE Int. Conf. Communication Systems (ICCS) (Singapore, 17–19 Nov, 2010). 2010. P. 289–294.
4. **Vullers R.** et al. Energy Harvesting for Autonomous Wireless Sensor Network // IEEE Solid-State Circuits Mag. 2010. Vol. 2. P. 29–38.
5. **Akaydin H.D., Elvin N., Andreopoulos Y.** Energy Harvesting from Highly Unsteady Fluid Flows Using Piezoelectric Materials // J. of Intell. Mater. Syst. Struct. 2010. Vol. 21, N 13. P. 1263–78.
6. **Zuo L., Tang X.** Large-scale vibration energy harvesting // J. of Intell. Mater. Syst. Struct. 2013. Vol. 24, № 11. P. 1405–1430.
7. **Gatti G.** Harvesting energy from the vibration of a passing train using a single-degree-of-freedom oscillator // Mechanical Systems and Signal Processing. 2016. Vol. 66–67. P. 785–92.
8. **Wischke M.** et al. Vibration harvesting in traffic tunnels to power wireless sensor nodes // Smart Mater. Struct. 2011. Vol. 20. P. 085014.
9. **Song D.** et al. Piezoelectric energy harvesting system for the vertical vibration of superconducting Maglev train // J Electroceram. 2013. Vol. 31, N 1–2. P. 35–41.