РАЗРАБОТКА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ТОКА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ПИТАНИЕМ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ И ПЛАТФОРМ

DEVELOPMENT OF PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY OF RAILROAD FREIGHT CARS

УДК 621.311.69

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

Исходя из параметров колебаний грузовых вагонов предложено несколько типов пьезоэлектрических генераторов тока с целью создания автономного источника питания для железнодорожного транспорта. Для каждого типа пьезогенератора разработана конструкция, которая наиболее эффективно преобразовывает энергию механических вибраций в электрическую энергию. Проведены экспериментальные исследования и сравнение предложенных конструкций пьезогенератора. Полученные данные свидетельствуют о возможности создания автономного источника питания на основе пьезоэлектрического генератора тока.

Based on the parameters of the vibrations of the freight cars the several types of piezoelectric harvesters for autonomous power supply of railway transport are proposed. For each type of piezoelectric harvester the design that most efficiently converts the energy of mechanical vibrations into electrical energy is developed. Experimental study and comparison of proposed designs of piezoelectric harvester are conducted. The obtained data show the possibility of creation of autonomous power supply based on piezoelectric energy harvester.

Для обеспечения навигационной поддержки железнодорожного транспорта, а также повышения безопасности при движении грузовых составов необходимо разработать автономный источник питания, который позволит обеспечить электроэнергией необходимые устройства определения местоположения и датчики контроля [1, 2]. В последнее время появились разработки и прототипы устройств, на основе которых возможно преобразование энергии из внешней среды в электроэнергию [3]. Кроме железнодорожного транспорта, автономные источники энергии могут применяться в других областях: мониторинге окружающей среды, обнаружении чрезвычайных ситуаций (пожар, землетрясение, цунами и т. д.), отслеживании местоположения объекта, контроле состояния промышленного

оборудования, автоматизации производственных процессов, биомедицинских системах [4, 5].

Использование электрохимических батарей сопряжено с некоторыми сложностями. Во-первых, из-за наличия тока утечки энергия батареи расходуется даже при отсутствии потребления со стороны устройства. Во-вторых, экстремальные внешние условия могут привести к выходу батареи из строя и отключению всей системы [6]. Кроме того, необходимость обслуживания и замены электрохимических источников питания требуют дополнительных затрат [7].

Механические вибрации являются распространенным источником энергии, удобным для сбора и преобразования [8]. Известны три основных способа преобразования энергии механических колебаний: пьезоэлектрический, электромагнитный

* НПЦ "СпецЭлектронСистемы" / SpecElectronSystems RPC.

и электростатический. Оптимальным является пьезоэлектрический способ, так как устройства на его основе эффективно преобразуют механическое напряжение в электрический заряд без дополнительных источников энергии и имеют достаточно простую технологию изготовления, что облегчает их использование в конкретных приложениях [9]. Принцип работы такого генератора тока основан на деформации пьезоэлемента, который состоит из гибкого основания с нанесенным пьезоэлектрическим материалом. При механическом воздействии на пьезоэлектрик происходит его поляризация, в результате чего возникает разность потенциалов между поверхностями пьезоэлектрического слоя. Полученный переменный сигнал выпрямляется и преобразуется для обеспечения работы подключенного устройства.

В зависимости от области применения, параметры механических колебаний могут значительно отличаться, что сильно влияет на уровень выходной мощности, а также требует определенной конструкции и типа пьезоэлемента для эффективного преобразования энергии. Поэтому важной задачей является настройка собственной частоты пьезогенератора на частоту внешнего воздействия, при которой наблюдаются наибольшие значения ускорения. В данной работе были исследованы механические колебания разных типов грузовых вагонов, определен диапазон частот колебаний с наибольшим значением ускорений, проведено сравнение разных конструкций пьезоэлектрических генераторов тока и экспериментально оценена эффективность каждой из них. Полученные данные могут быть использованы для разработки технологии производства пьезоэлектрического генератора тока, предназначенного для обеспечения автономным питанием грузовых вагонов и платформ.

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 вагона 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

Рис.1. Вертикальные колебания грузовых вагонов

Fig.1. Vertical acceleration of the freight cars

Рис.2. Балочный пьезоэлемент: а – общий вид; b – поперечный разрез

Fig.2. Piezoelectric beam element: a – general view; b – cross-section

перевозки большой номенклатуры грузов, не требующих защиты от атмосферных осадков: насыпных непылевидных, навалочных, штабельных и тарно-штучных.

Как видно из рис.1, уровень вертикальных ускорений зависит от типа подвижного состава (конструкции и типа тележек), а также загруженности, причем на цистерне уровень ускорений в груженом состоянии больше, чем в порожнем, 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 ускоре-

Рис.3. Электронная схема обработки сигнала с пьезоэлемента
Fig.3. Rectifying electrical circuit

ний, 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, возникающие от стыков и дефектов пути, могут превышать 0,8g.

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 скорости 60 км/ч находится на частоте около 5,6 Гц, а при 135 км/ч – на частоте 12,1 Гц.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ТОКА

Исходя из требований, обусловленных областью применения пьезоэлектрических генераторов тока, было выбрано два типа пьезоэлементов, способных работать на малых частотах и ускорениях возбуждающей силы: мембранные и балочные. Основными задачами являются настройка собственной частоты колебания пьезоэлемента на частоту внешнего воздействия, обработка и накопление сгенерированного сигнала. Конструкция должна выдерживать влияние внешней среды и иметь достаточную прочность, чтобы выдерживать перегрузки, возникающие при движении железнодорожного транспорта.

Экспериментальный образец пьезогенератора балочного типа реализован на основе пьезоэлемента V25W (рис.2) фирмы MideTechnologies. Пьезоэлемент состоит из гибкого основания ESPANEX, которое представляет собой слой полиимида, покрытого медной фольгой. На основание с обеих сторон с помощью эпоксидного клея наносится сегнетомягкая пьезокерамика CTS-3195HD. Для защиты от негативного воздействия внешней среды пьезоэлемент

Рис.4. Зависимость выходной мощности балочного пьезогенератора от нагрузочного сопротивления R (a) и ВАХ балочного пьезогенератора (b)

Fig.4. The dependence of the output power of beam piezoelectric energy harvester on the load resistance R (a) and current-voltage diagram of beam piezoelectric energy harvester (b)

покрывается стеклотекстолитом FR4. На свободный конец устанавливается добавочный груз массой 50 г, благодаря чему собственную частоту пьезоэлемента удастся снизить до 8,7 Гц. Электронная схема обработки сигнала с выхода пьезоэлемента представлена на рис.3. Измерения проводились на электродинамической вибрационной установке V650 НРАК-СЕ. Результаты измерений при ускорении внешних вибраций $a = 0,21g$ и частоте $f = 8,7$ Гц при разных нагрузочных сопротивлениях представлены на рис.4.

Как следует из представленных экспериментальных данных, выходная мощность балочных пьезогенераторов может достигать 3,5 мВт. Таким образом, при размещении на каждом грузовом вагоне 100 пьезоэлементов накапливаемой энергии будет достаточно, чтобы обеспечить работу GPS-и GSM/GPRS-модулей. Для увеличения выходной мощности и уменьшения габаритов устройства была предложена конструкция пьезогенератора, в котором пьезоэлементы расположены в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (рис.5). Такая конструкция позволит собирать энергию не только поперечных, но и продольных колебаний вагона.

Для стабилизации выходного напряжения относительно внешнего воздействия использовалась электронная схема LTC3588-1 (рис.6), предназначенная для источников энергии с

Рис.5. Упрощенная конструкция балочного пьезогенератора
Fig.5. Simplified design of the beam piezoelectric energy harvester

высоким выходным сопротивлением, таких как пьезоэлектрические, солнечные и магнитные преобразователи. Схема содержит встроенный диодный мост и понижающий преобразователь напряжения с малыми потерями. Изначально энергия с пьезоэлемента накапливается на конденсаторе $C_{storage}$ до момента, когда преобразователь сможет эффективно передать энергию на выходной конденсатор с заданным выходным напряжением. При проведении измерений

Рис.6. Схема обработки и стабилизации сигнала с пьезогенератора

Fig.6. Diagram for the signal processing and stabilization of the piezoelectric energy harvester

Рис. 7. Пьезоэлемент мембранного типа

Fig.7. Piezoelectric membrane element

напряжение на выходе схемы стабилизации – 3,6 В.

Экспериментальный образец мембранного пьезогенератора реализован на основе пьезоэлемента, который состоит из латунного основания и одного слоя пьезокерамики (рис.7). Для обработки сигнала использовалась такая же электрическая схема, как и в случае балочного пьезогенератора (рис.3). Регулировка резонансной частоты осуществлялась с помощью дополнительных грузов, которые размещались в центре мембраны. Изначально мембранный пьезоэлемент обладает высокой собственной частотой (около 500 Гц), что не применимо для

использования на железнодорожном транспорте. Снижение собственной частоты за счет грузов большей массы не является эффективным, так как в результате значительно увеличивается общая масса пьезогенератора и уменьшается его прочность. Для решения проблемы между пьезоэлементом и грузом была добавлена пружина (рис.8), что позволило значительно снизить собственную частоту системы без увеличения массы груза. На рис.9 представлен результат моделирования колебаний описанной структуры на частоте 10 Гц. Как видно, наряду с высокочастотными колебаниями, которые определяются собственной частотой самого пьезоэлемента, возникают низкочастотные колебания, обусловленные наличием пружины. Более высокая частота складывается с низкой частотой, которая зависит от параметров пружины (длины, диаметра, коэффициента жесткости), причем наибольшие деформации соответствуют низкой частоте. Как видно из рис.10, данная конструкция позволяет собирать энергию как поперечных, так и продольных колебаний.

Экспериментальные результаты измерений выходной мощности мембранного пьезогенератора с пружинами разных геометрических размеров и жесткости приведены на рис.11 (параметры внешнего воздействия одинаковы для каждого случая: масса добавочного груза 250 г, ускорение 0,5g, частота 15 Гц). На основе полученных данных можно сделать вывод, что наличие пружины

Рис. 8. Конструкция мембранного пьезогенератора с пружиной

Fig.8. Design of membrane piezoelectric energy harvester

Рис.9. Осциллограмма колебания мембранного пьезогенератора с пружиной на частоте 10 Гц (a) и спектр колебания мембранного пьезогенератора (b)

Fig.9. Oscillogram of vibrations of the membrane piezoelectric energy harvester with a spring at a frequency of 10 Hz (a) and the range of fluctuations of the membrane piezoelectric energy harvester (b)

жины между грузом и пьезоэлементом позволяет значительно снизить собственную частоту системы и увеличить выходную мощность пьезогенератора. Малые значения выходной мощности мембранного пьезогенератора относительно балочного обусловлены такими его особенностями, как жесткое металлическое основание, один слой пьезокерамики, высокая собственная частота. Полученные данные позволяют оценить эффективность и преимущества конструкции мембранного пьезогенератора с пружиной по сравнению с обычной конструкцией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований характеристик колебаний железнодорожного транспорта было установлено, что грузовые вагоны испытывают колебания на низких частотах (1,5–18 Гц) и малых ускорениях (0,015–0,27g). Для эффективного преобразования энергии требуются пьезогенераторы, собственная частота которых близка к частоте колебания вагонов. Пьезогенераторы балочного и мембранного типа наиболее подходят для этих целей.

Рис.10. Основные моды колебаний мембранного пьезогенератора с пружиной

Fig.10. Main vibration modes of the membrane piezoelectric energy harvester with spring

Рис.11. Экспериментальные результаты измерений мембранного пьезогенератора с разными пружинами
Fig.11. Experimental measurements of membrane piezoelectric energy harvester with different springs

На основе полученных данных видно, что балочные пьезоэлементы позволяют накопить большее количество энергии по сравнению с мембранными. Однако балочные пьезоэлементы способны регистрировать колебания только в плоскости изгиба балки, поэтому для увеличения выходной мощности их необходимо располагать в трех пространственных измерениях, что усложняет конструкцию конечного устройства.

Мембранный пьезоэлемент может регистрировать как поперечные, так и продольные колебания, для этого целесообразна конструкция с пружиной между добавочным грузом и мембраной. Результаты измерений показывают, что данная конструкция позволяет существенно снизить собственную частоту системы и увеличить выходную мощность. Ограничивающим фактором в этом случае является жесткость самой мембраны, поэтому для увеличения выходной мощности необходимы опытные образцы, обладающие менее жестким металлическим основанием. Таким образом, используя конструкцию мембранного элемента с пружиной, удастся сочетать преимущества балочного элемента (малая масса добавочного груза, простота установки на железнодорожный транспорт) и мембранного (возможность регистрации колебаний в трех пространственных измерениях, высокая выходная мощность).

Полученные результаты свидетельствуют о возможности создания автономного пьезоэлектрического генератора тока для железнодорожного транспорта, который способен обеспечить достаточное количество энергии для совместной работы модулей GPS и GSM/GPRS.

Работа выполнена в ЗАО "НПЦ СпецЭлектронСистемы" при поддержке Минобрнауки РФ в рамках соглашения RFMEFI579X0086 (№ 14.579.21.0086).

ЛИТЕРАТУРА

1. Tianchen Y., Jian Ya., Ruigang S., Xiaowei L. Vibration energy harvesting system for railroad safety based on running vehicles. Smart Mater. Struct. 2014. Vol. 23. P. 1-14.
2. 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.
3. Shaikh F.K., Zeadally Sh. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 55. P. 1041-54.
4. Zuo L., Tang X. Large-scale vibration energy harvesting // J. of Intelligent Material Systems and Structures. 2013. Vol. 24. N 11. P. 1405-1430.
5. Energy harvesting technologies / Ed. Shashank Priya, Dan Inman. Springer, 2009. 522 p. ISBN 978-0-387-76464-1.
6. Tiliute D.E. Battery management in wireless sensor networks // Electronics and Electrical Engineering. 2007. Vol. 76. N 4. P. 9-12.
7. Caliò R., Rongala U.B., Camboni D. et al. Piezoelectric Energy Harvesting Solutions. Sensors. 2014. Vol. 14. P. 4755-90.
8. De Pasquale G. Energy harvesters for powering wireless systems // Handbook of Mems for Wireless and Mobile Applications. Elsevier, 2013. Ch. 11. P. 345-400.
9. Erturk A., Inman D.J. Piezoelectric Energy Harvesting / Wiley, 2011. ISBN 9780470682548.