УДК 539.2 + 534.8

К. Е. Аббакумов, Р. С. Коновалов, В. М. Цаплев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Экспериментальное исследование дискового биморфного пьезоэлектрического генератора

Представлены результаты экспериментального исследования дискового биморфного пьезоэлектрического генератора из двух пьезокерамических пластин ЦТС-19 с дополнительной массой в виде латунного кольца. Приведены частотные характеристики смещения по радиусу пластин и кольца, а также частотная характеристика напряжения на выходе. Исследованы режим холостого хода, а также режим нагрузки. По нагрузочной характеристике получено значение внутреннего сопротивления. Оценена удельная мощность преобразователя.

Пьезоэлектрический генератор, биморфная пластина, амплитудно-частотная характеристика, изгибные колебания, удельная мощность, выходное напряжение

Разработка, исследование и создание микроминиатюрных пьезоэлектрических генераторов является весьма актуальной и важной проблемой, привлекающей большое число исследователей. Интерес к этой проблеме обусловлен перспективой создания малогабаритных независимых и практически неисчерпаемых источников питания различных автономных устройств радиоэлектроники. Такие источники преобразуют даровую энергию вибраций, присутствующих практически везде, в электрическую энергию и не требуют наличия внешних источников питания или необходимости постоянных расходов на периодическую замену батарей и на их химическую переработку.

В одной из наиболее ранних работ по получению электрической энергии из вибраций для питания микроэлектронных устройств [1] было обосновано преимущество пьезоэлектрического способа по сравнению с электромагнитным или электростатическим. В обстоятельных обзорах [2], [3] показано, что основным достоинством пьезоэлектрического способа преобразования энергии является большая, по сравнению с остальными способами преобразования, удельная получаемая мощность, а также большая простота конструкции. Диапазон значений получаемых напряжений значительно шире, нежели у всех остальных типов генераторов. К недостаткам пьезоэлектрического способа получения энергии можно отнести большое выходное сопротивление источника, однако этот недостаток можно легко компенсировать правильным выбором количества элементов пьезогенератора и способом их включения – параллельным или последовательным. Более того, этот недостаток можно обратить в достоинство – подбором элементов и способа их включения можно получить практически любые требуемые значения выходного напряжения и внутреннего сопротивления.

Удельная мощность, получаемая от пьезоэлектрических генераторов, несколько меньше, чем получаемая от солнечных батарей, однако, по оценкам авторов, и по этому показателю пьезоэлектрические генераторы могут сравниться с ними, если использовать режим нелинейных колебаний. К тому же, производительность солнечных батарей сильно зависит от уровня солнечной энергии в месте их расположения.

Различные варианты реализации пьезогенераторов рассмотрены в обстоятельной монографии [4]. Показано, что возможно использование как продольных, так и поперечных колебаний, однако

в большинстве случаев пьезогенераторы выполняются в форме консольной балки, один конец которой зажат в опоре, а другой свободен. На балку наклеены 1 или 2 пьезоэлектрических слоя (образуя, таким образом, униморфную или биморфную конструкцию). Возможны также конструкции с промежуточным металлическим базовым слоем, на который наклеены 2 пьезоэлемента (триморфные конструкции) или большее число слоев. Возбуждение происходит в точке закрепления консоли. Для снижения рабочего частотного диапазона пьезоэлектрической биморфной (триморфной) балки и для увеличения нагрузки на ее свободный конец помещается пассивный груз.

Таким образом, можно заключить, что пьезоэлектрический способ получения электрической энергии характеризуется большой гибкостью выбора конкретной конструкции. В настоящей статье описывается дисковый биморфный пьезоэлектрический генератор. В отличие от балочной структуры такая конфигурация представляется более рациональной в отношении компоновки.

Описание конструкции. Биморфный элемент пьезогенератора схематически изображен на рис. 1 (h – общая толщина пластины, a – радиус диска). Теория дискового биморфного пьезоэлемента, опертого по образующей и совершающего изгибные колебания, а также расчет его характеристик приведены в работах [5], [6]. Здесь рассмотрим грибковый биморфный пьезоэлемент, опертый в центре, совершающий колебания, амплитуда которых мала по сравнению с его толщиной.

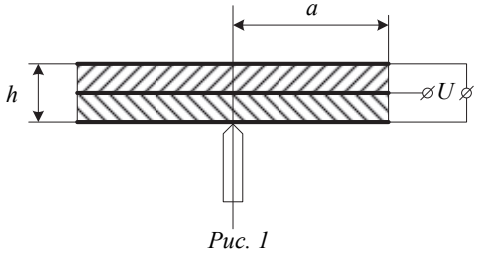


Рис. 1

Исходные уравнения пьезоэффекта записываются в виде:

$$u_{rr} = s_{11}^E \sigma_{rr} + s_{12}^E \sigma_{\theta\theta} + d_{31} E_z,$$
$$u_{\theta\theta} = s_{12}^E \sigma_{rr} + s_{11}^E \sigma_{\theta\theta} + d_{31} E_z,$$
$$D_z = d_{31} \sigma_{rr} + d_{31} \sigma_{\theta\theta} + \varepsilon_{33}^{\sigma} E_z,$$

где u_{rr}, $u_{\theta\theta}$ – компоненты тензора деформаций; σ_{rr}, $\sigma_{\theta\theta}$ – компоненты тензора механических напряжений при изгибе; E_z – напряженность электрического поля; D_z – электрическая индукция; s_{11}^E, s_{12}^E – компоненты тензора упругой податливости при постоянной напряженности электрического поля; d_{31} – компоненты тензора пьезомодуля; $\varepsilon_{33}^{\sigma}$ – компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости пьезокерамики при постоянстве напряжения. Компоненты тензора изгибной упругой деформации определяются так:

$$u_{rr} = -z \frac{d^2\eta}{dr^2},\ u_{\theta\theta} = -\frac{z}{r}\frac{d\eta}{dr},$$

где z – аксиальная координата; r – радиус-вектор; θ – угол; η – прогиб. Следует учитывать, что при отсутствии пространственных зарядов $\operatorname{div} \boldsymbol{D} = 0$, а при отсутствии магнитного поля $\operatorname{rot} \boldsymbol{E} = 0$. Тогда напряжение на обкладках биморфа

$$U(z>0) = \int_0^{h/2} E_z dz,\ U(z<0) = -\int_{-h/2}^{0} E_z dz\ ,$$

а ток через преобразователь

$$I = j\omega \int_0^a D_z 2\pi r\, dr\ ,$$

где ω – круговая частота. Уравнение движения для случая изгибных колебаний при гармоническом возбуждении в центре биморфной пластины запишется в виде

$$\frac{dM_t}{dr} - \frac{d^2(rM_r)}{dr^2} - \omega^2 rh\rho\eta = F\cos\omega t\ ,$$

где F – амплитудное значение силы в центре биморфной пластины; ρ – плотность пьезокерамики; M_t и M_r – интенсивности моментов на единицу длины:

$$M_t = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\theta\theta}\, z\, dz,\ M_r = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{rr}\, z\, dz.$$

В центре диска выполняются условия:

$$\eta\big|_{r=0} = 0\ ;\ M_r\big|_{r=0} = 0\ .$$

Следует, однако, иметь в виду, что «чисто биморфная» конструкция, пригодная для построения приемного преобразователя, не очень хорошо подходит для решения проблемы получения энергии. Дело в том, что слои пьезокерамики, находящиеся вблизи от нейтрального сечения, испытывают очень небольшие, близкие к нулю меха-

нические напряжения. Соответственно, в этих слоях накапливается весьма небольшая электроэнергия. Такой режим работы используется приемными преобразователями для регистрации слабых сигналов, которые затем усиливаются предварительным усилителем. Слабый приемный сигнал позволяет, кроме того, избежать появления нелинейных искажений. Для режима генерации энергии появление нелинейных искажений не имеет никакого значения, наоборот, пьезокерамика, работающая в нелинейном режиме, реализует значительно больший пьезомодуль, чем при малых уровнях возбуждения. Показано [7], что при уровнях механических напряжений в пьезокерамике порядка 60…80 МПа поперечный пьезомодуль d_{31} мягкой пьезокерамики (такой, например, как ЦТС-19) имеет значение не $100 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, как это регламентирует ГОСТ 13927–74, а примерно в 3 раза больше, т. е. около $300 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. Поскольку плотность электрической энергии, вырабатываемой пьезоматериалом, пропорциональна квадрату пьезомодуля, то нелинейный режим позволяет получить выигрыш по энергии примерно на порядок по сравнению с линейным режимом.

Это означает, что конструктивно преобразователь должен быть выполнен не в виде «биморфа», а в виде «триморфа», т. е. представлять собой две пьезокерамические пластины с встречной поляризацией, наклеенные на промежуточную базовую металлическую пластину, с тем чтобы пьезокерамика находилась в области значительных механических переменных напряжений.

Однако при этом увеличивается толщина изгибного биморфного (примем, по традиции, термин «биморф») пьезоэлемента, который в этом случае выходит из нужного диапазона виброчастот вследствие увеличения частоты его собственного грибкового резонанса. В связи с этим для снижения частоты его резонанса по окружности на подложку наклеивалось достаточно массивное металлическое кольцо. Преобразователь имеет вид, показанный на рис. 2.

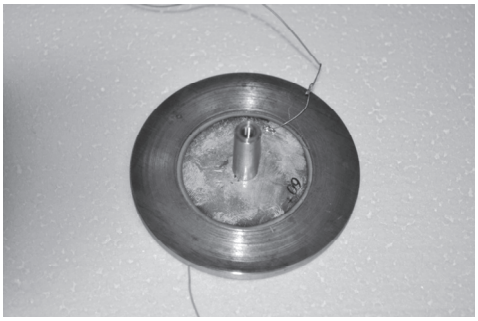
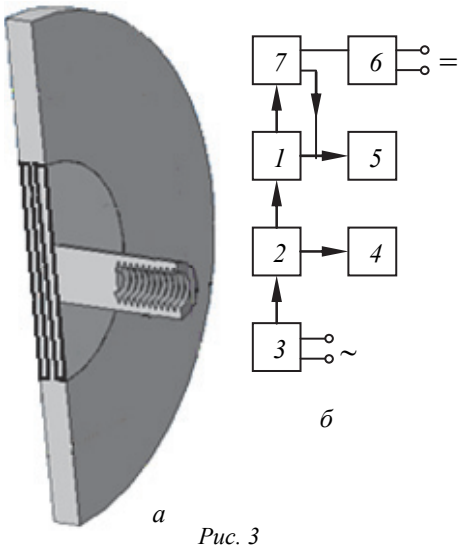


Рис. 2

Следует заметить, что на данном этапе исследования не ставилась задача реализации нелинейного режима, который требует значительного уровня возбуждения. Пока было решено ограничиться отработкой макета при низких уровнях возбуждения.

Экспериментальные результаты. Для экспериментального исследования был изготовлен макет пьезоэлектрического генератора (ПГ), состоявший из биморфного пьезоэлемента, вклеенного в металлическое кольцо. Эскиз макета в разрезе представлен на рис. 3, *а*. Биморфный пьезоэлемент из двух склеенных салолом пьезопластин ЦТС-19 размером $\varnothing 32.0 \times 0.2$ мм жестко закреплялся в латунном кольце (внутренний и внешний диаметры – 32 и 70 мм соответственно, толщина – 8 мм). К одной из его поверхностей был приклеен держатель, с помощью которого макет крепился к вибростенду. Таким образом, пьезогенератор представлял собой грибковую конструкцию, работающую на изгибном («грибковом» или «зонтиковом») резонансе. Пьезопластины были наклеены на подложку таким образом, что векторы поляризации каждой из пластин были направлены во встречных направлениях. Электрически наружные серебряные электроды соединялись между собой так, как показано на рис. 1, а внутренние электроды соединялись с подложкой.



б

а

Рис. 3

Параметры ПГ измерялись на лабораторном стенде (рис. 3, *б*). Цифры на рисунке обозначают: *1* – макет ПГ; *2* – генератор сигналов; *3* – частотомер; *4* – осциллограф; *5* – электродинамический вибратор; *6* – предварительный усилитель с блоком питания; *7* – вибродатчик (ВД). Данная

схема позволяла измерять параметры ПГ в широком диапазоне частот – 400…1000 Гц, соответствующих частотам собственных колебаний различного рода транспортных систем и промышленного оборудования. Для этого с помощью держателя (ножки грибка) ПГ размещался на керне электродинамического вибратора *5*. Осциллографом со встроенным вольтметром *4*, частотомером *3* и ВД *7*, обладающим равномерной частотной характеристикой в диапазоне 10…10 000 Гц, измерялись вырабатываемое напряжение и смещение поверхности ПГ в зависимости от частоты колебаний.

Амплитуды колебательных смещений поверхности ПГ измерялись дискретно в трех точках на противоположной стороне от держателя: в центре и на расстояниях 13 и 27 мм от центра. ВД имел незначительную массу (1.8 г) по сравнению с массой ПГ (105.5 г), что позволяло не учитывать влияние этой вносимой массы на результаты измерений.

Общий вид измерительной установки приведен на рис. 4.

Рис. 4

На рис. 5 представлены амплитудно-частотные характеристики ПГ в режиме холостого хода. Максимальные амплитуды колебательных смещений поверхности ПГ x в зависимости от частоты колебаний f получены для трех рассмотренных точек размещения ВД. Зависимость *1* соответствует случаю размещения ВД в центре биморфного элемента, зависимость *2* – случаю размещения ВД на расстоянии 13 мм от центра, зависимость *3* – случаю размещения ВД на расстоянии 27 мм по радиусу от центра. Следует отметить, что наблюдается смещение максимумов кривых в сторону более низких частот. Это смещение может объясняться влиянием вносимой массы ВД, однако возможны и другие причины, которые могут быть выяснены при дополнительном исследовании. Из рис. 5 видно, что максимальное смещение поверхности ПГ достигается в центре, а на его краю оно минимально.

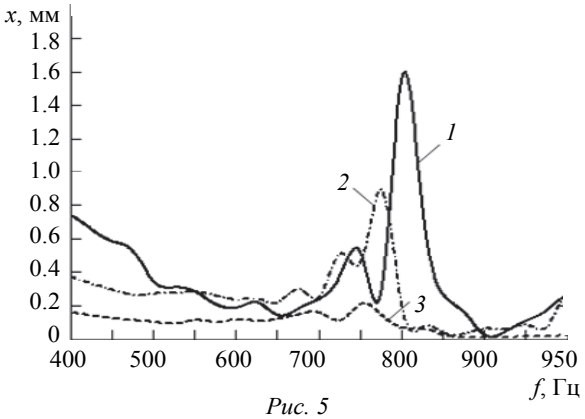


Рис. 5

На рис. 6 приведена зависимость амплитуды вырабатываемого ПГ выходного напряжения U от частоты колебаний f в режиме холостого хода. Можно видеть, что ПГ обладает ярко выраженным резонансом вблизи 850 Гц. Достигнутая амплитуда электрической мощности на этой частоте составила ~ 4,5 мВт, а напряжение ~16 В.

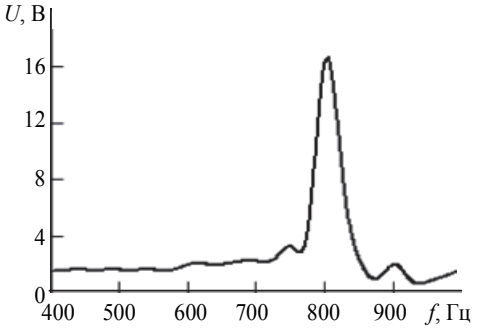


Рис. 6

В целом, в ходе эксперимента амплитуда выходного напряжения в режиме холостого хода не снижалась ниже 1.5 В, а амплитуда электрической мощности – ниже 0.5 мВт. Максимальное значение амплитуды выходного напряжения, которое было получено в режиме холостого хода, составляло 32 В и было ограничено возможностями вибростенда, на котором выполнялись измерения.

Для измерения внутреннего сопротивления ПГ была получена нагрузочная характеристика выходного напряжения на частоте основного резонанса. Она представлена на рис. 7. Внутреннее сопротивление ПГ оказалось равным 17 кОм. Электрическая мощность, вырабатываемая пьезогенератором на согласованной нагрузке, составила ~ 15 мВт, т. е. удельная мощность была равна примерно 50 мВт/см^3.

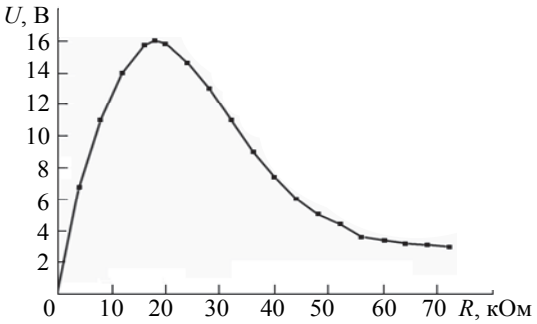


Рис. 7

По результатам эксперимента можно сделать вывод о том, что рассмотренная конструкция ПГ обладает рядом преимуществ по сравнению с большинством существующих конструкций ПГ в виде балок. Это, прежде всего, возможность совмещения как толщинных, так и изгибных колебаний пьезоэлемента, что способствует увеличению амплитуды вырабатываемой электрической мощности. Однако следствием этого является требование к повышению прочности пьезоэлемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Williams C. B., Yates R. B. Analysis of a Micro-electric Generator for Microsystems // Sensors and Actuators A: Physical. 1996. Vol. 52, № 1–3. P. 8–11.

2. Sodano H., Park G., Inman D. J. A Review of Power harvesting from Vibration Using Piezoelectric Materials // The Shock and Vibration Digest. 2004. Vol. 36, № 3. P. 197–205.

3. Anton S. R., Sodano H. A. A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric materials (2003–2006) // Smart materials and Structures. 2007. Vol. 16. P. 1–21.

4. Erturk A., Inman D. J. Piezoelectric Energy Harvesting. N.-Y.: Wiley, 2011.

5. Браилов Э. С., Вассергисер М. Е. Оценка характеристик дискового биморфного пьезоэлемента, совершающего изгибные колебания // Акустический журн. 1980. Т. XXVI, № 4. С. 590–595.

6. Антоняк Ю. Т., Вассергисер М. Е. Расчет характеристик изгибного пьезоэлектрического преобразователя мембранного типа // Акустический журн. 1982. Т. XXVIII, № 3. С. 294–302.

7. Цаплев В. М. Нелинейная акустоупругость пьезокерамических материалов: в 2 ч. Ч. I: Физическая акустика пьезокерамики. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013.

K. E. Abbakumov, R. S. Konovalov, V. M. Tsaplev
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

EXPERIMENTAL STUDY OF DISK BIMORPH PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER

The results of experimental study of a disk bimorph piezoelectric energy harvester are presented. The device contains two piezoceramic PZT-19 plates and an additional brass ring mass. Frequency response of vibrational displacement along the radii of the plate and the ring mass and the output voltage frequency response are presented. The idle mode and the load duty are investigated. The value of the internal resistance is obtained using the load characteristic. Piezoelectric specific power is estimated.

Piezoelectric energy harvester, bimorph plate, amplitude-frequency characteristic, flexural vibration, specific power, output voltage