

**Воробьев Андрей Николаевич**

магистрант

ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»

г. Москва

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.  
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ**

*Аннотация:* в статье рассмотрены перспективы применения твердотельных пьезокерамических преобразователей электрической энергии, основные физико-технические характеристики пьезоэлектриков. Автором приведены результаты исследования двух типов многослойных твердотельных батарей.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрик, пьезоэлектрический преобразователь, пьезогенератор.

В настоящее время в мире все более пристальное внимание стало уделяться исследованиям в области альтернативных источников электроэнергии. Широкое распространение во многих областях техники начинают получать пьезогенераторы электрической энергии. Пьезогенератор (ПГ) электрической энергии – это устройство, способное генерировать электрическую энергию под действием механических усилий, используя прямой пьезоэффект. Уже известно несколько случаев практического применения данного вида энергии. Например, на одной из станций Токийского метро были установлены ПГ. Вырабатываемой за счет движения пассажиров энергии хватало для обеспечения работы станционных турникетов. В Лондоне, в помещениях одной из элитных дискотек посредством ПГ осуществляется питание системы освещения. Также совсем недавно израильскими учеными-исследователями фирмы Innowattech было сделано громкое заявление о возможности получения электроэнергии из дорожного полотна, используя давление проезжающего по нему автотранспорта. И даже более того – ими были проведены успешные натурные испытания.

Многослойные пьезоэлектрические генераторы в силу некоторых положительных особенностей, таких как увеличенное значение статической емкости и относительно большой генерируемый заряд, могут быть использованы в качестве твердотельных батарей (ТТБ). Также одним из важных преимуществ данного вида источников питания является отсутствие электромагнитных полей, создающих помехи.

Как было сказано выше, широкое распространение получили исследования возможностей использования ПГ в области малой энергетики. Современные пьезокерамические конструкции с толщиной пьезокерамических слоев 25–150 мкм позволяют создавать твердотельные элементы питания для устройств с небольшой мощностью потребляемой энергии. К ним относятся малогабаритные бытовые устройства, телефоны сотовой связи, для контроля и диагностики технического состояния объектов и многое другое. В настоящее время исключительную актуальность приобретает возможность использования ТТБ в беспроводных системах безопасности и охраны.

Рассмотрим основные физико-технические характеристики пьезоэлектриков.

Под действием давления на пьезоэлектрик на его электродах возникнет напряжение, величина которого будет определяться выражением (1):

$$U = \frac{g_{33} h T}{n} \quad (1)$$

*h* – толщина пьезоэлемента;

*n* – количество слоев.

Исходя из вышеописанных формул (2–5) видно, что качество твердотельных батарей характеризуется множеством факторов и зависит как от физических свойств применяемого пьезокерамического материала, так и от его геометрии и конструктивных параметров:

$\epsilon_{33}^T$  – диэлектрическая проницаемость;

$K_{33}$  – коэффициент электромеханической связи;

$d_{33}$  – пьезомодуль;

$g_{33}$  – пьезоэлектрический модуль по напряжению;

$S_{33}^0$  – упругая податливость;

$\rho$  – плотность.

Итак, во время деформации пьезоэлемента возникает заряд, плотность которого определяется выражением (2):

$$\frac{Q}{S} = d_{33} T_n \quad (2)$$

$Q$  – заряд;

$S$  – площадь поверхности.

Запасенная при этом энергия будет определяться выражением (3):

$$W_0 = \frac{V}{2} S_{33}^0 T^2, \quad (3)$$

где  $V$  – объем;

В свою очередь запасенная энергия состоит из энергии механической деформации (4) и электрической энергии (5):

$$W_m = \frac{V}{2} (1 - K_{33}^2) S_{33}^0 T^2, \quad (4)$$

$$W_{el} = \frac{V}{2} K_{33}^2 S_{33}^0 T \quad (5)$$

Был проведен анализ основных параметров некоторых пьезокерамических материалов, таких как: ЦТС-46 (Россия), РХЕ-5 (Голландия), APS-855 (США), Pic-151 (Германия), PZJ-5 (Англия), AC-900 (Япония), PZ-29 (Дания). В ходе анализа также сравнивались расчетные значения этих пьезоматериалов:  $\frac{W_n}{V}, \frac{Q}{S}, \frac{U}{h}$ .

Расчетные значения колебались:

$\frac{W_n}{V}$  – от  $2,2 \times 10^5$  до  $2,8 \times 10^5$  (максимально для PZ-29);

$\frac{Q}{S}$  – от  $4 \times 10^{-2}$  до  $5,8 \times 10^{-2}$  (максимально для APS-855);

$\frac{U}{h}$  – от  $15 \times 10^5$  до  $23 \times 10^5$  (максимально для AC-900).

Из проведенного анализа следует, что пьезогенераторы на основе тонкопленочных пьезоэлементов (толщиной от 25 до 150 мкм) при предельном значении давления ( $T \leq 10^{-8}$  Н/м<sup>2</sup>) обеспечивают относительно высокий коэффициент преобразования механической энергии в напряжение и низкий по заряду.

Исходя из вышеизложенного и принимая во внимание, что за счет увеличения слоев в изделиях (до 1000 и более) может быть увеличен максимальный за-

ряд ( $Q \approx 60 \text{ Кл/м}^2$ ), а напряжение уменьшено (до  $U_{\min} = 22 \times 10^2 \text{ В/м}$ ), можно сделать вывод, что пьезогенераторы на основе описанных пьезоматериалов могут быть использованы в ТТБ для питания электронных устройств с низким энергопотреблением.

Принципиальная электрическая схема включения пьезогенератора приведена на рисунке 1.

На рисунке:

ПГ – пьезогенератор;

VD1 – диод, предотвращающий отток заряда к ПГ при снижении механического давления;

VD2 – диод, обеспечивающий разряд обратного напряжения, возникающего на ПГ при понижении механического давления после перекачки энергии на конденсатор  $C_h$ ;

$C_h$  – конденсатор, обеспечивающий накопление заряда и снижение напряжения на ПГ до требуемой величины.

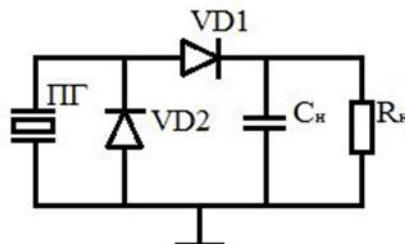


Рис. 1

Многослойный пьезогенератор имеет статическую емкость, определяемую выражением (6):

$$C_0 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{h} \quad (6)$$

Значение емкости конденсатора  $C_h$  зависит от необходимого значения напряжения батареи  $V_p$  и расчетного значения напряжения на пьезогенераторе  $V_0$  и может быть рассчитано из соотношения (7):

$$C_0 V_0 = (C_h + C_0) V_p \quad (7)$$

Выходная электрическая энергия будет определяться выражением (8):

$$W_p = \frac{1}{2} C_h V_p^2 \quad (8)$$

или может быть представлена в виде (9):

$$W_p = \frac{Q_p V_p}{2} \quad (9)$$

А запасенная электрическая энергия (10):

$$W_0 = \frac{Q_0 V_0}{2} \quad (10)$$

Из расчета, что  $Q_0 = Q_p$ , значение запасенной электрической энергии твердотельной батареи будет представлено выражением (11):

$$W_p = \frac{C_0^2}{2C_p} V_0^2 \quad (11)$$

При  $C_h = C_p$  достигается идеальное согласование пьезогенератора.

Были проведены исследования двух вариантов многослойных твердотельных батарей.

В основу первого варианта конструкции ТТБ были положены 16 многослойных пьезоэлементов с размерами одного элемента 6 мм × 6 мм × 2,7 мм., которые соединялись между собой последовательно с помощью клея. Электрическое соединение данных элементов было параллельное. Затем они были помещены в металлический корпус (нержавеющая сталь) диаметром 10 мм и длиной 55 мм. Статическая емкость ПГ составила 8 мкФ.

Второй вариант исследуемой ТТБ состоял из одного слоя многослойных пьезоэлементов такого же размера. Данные пьезоэлементы в количестве 36 шт. были расположены на ситалловой подложке размером 40 мм × 40 мм × 5 мм линейками по 6 шт. Электрическое соединение – параллельное. Механическое соединение пьезоэлементов с подложкой осуществлялось посредством клея КЛТ. Для обеспечения равномерного распределения давления между пьезоэлементами получившаяся конструкция сверху также была закрыта ситалловой подложкой. Статическая емкость ПГ составила 8 мкФ.

Для проведения исследования, элементы подключались в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1. При этом были использованы:

- VD1 и VD2 – диоды типа КД102;
- $C_h$  – конденсатор на основе пьезокерамики ЦТС-46 с емкостью 10 мкФ;

–  $R_h = 20 \text{ кОм}$ .

На пьезогенераторы оказывалось давление до  $10^9 \text{ Н/м}^2$  посредством специального приспособления. Получаемое выходное напряжение регистрировалось осциллографом С1–114.

На рисунке 2 представлены зависимости выходных напряжений от прилагаемого давления для исследуемых конструкций ТТБ.

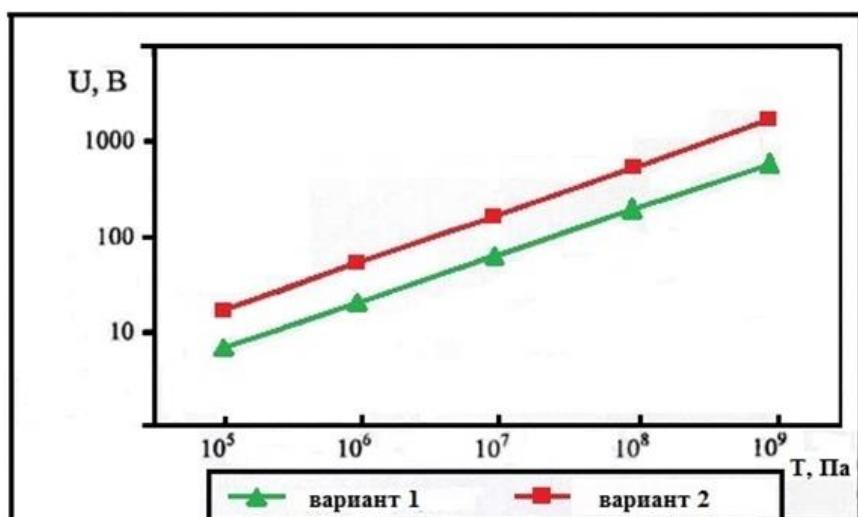


Рис. 2

В таблице 2 представлены зависимости величин накопленных зарядов и электрической энергии на конденсаторе от прилагаемого давления.

Таблица 2

Давление, $\text{Н/м}^2$	Заряд $10^{-6}, \text{ Кл}$		Электрическая энергия $10^{-6}, \text{ Дж}$	
	Конструкция		Конструкция	
	I	II	I	II
$10^4$	0,066	0,176	0,002	0,007
$10^5$	0,66	1,76	0,021	0,077
$10^6$	6,6	17,6	2,1	7,7
$10^7$	66	176	210	770
$10^8$	660	1760	21000	77000

Из анализа полученных результатов проведенных исследований мы видим, что погрешность экспериментальных данных не превышает  $\pm 10\text{--}15\%$  от расчетных значений.

Многослойные конструкции ПГ за счет согласования емкости ПГ и емкости ТТБ при низком значении напряжения позволяют оптимизировать параметры. Но при этом запасенная электрическая энергия меньше, чем при использовании монолитной конструкции ПГ с той же геометрией.

### ***Список литературы***

1. Панич А.Е. Перспективные конструкции и технологии создания гибких зеркал для адаптивных оптических систем / А.Е. Панич, А.И. Сокалло, Е.А. Гришин [и др.] // Микросистемная техника. – 2002. – №4. – С. 60–64.
2. Пьезоэлектрическое приборостроение А.В. Гориш, В.П. Дудкевич, М.Ф. Куприянов [и др.]; под ред. А.В. Гориш. – Т.1. Физика сегнетоэлектрической керамики – М.: ИПРЖР.1999. – 368 с.
3. Физика и технология сегнетокерамики / А.Е. Панич, М.Ф. Куприянов; Рост. гос. ун-т. – Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 1989. – 180 с.
4. Definition of Constants for Piezoceramic Materials / V.A. Akopyan et al. Nova Science Publishers, Inc. – N.-Y., 2010.
5. Proc. 7th Brazilian Conf. on Dynamics, Control and Applications. «Dincon 2008» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.dem.feis.unesp.br](http://www.dem.feis.unesp.br)
6. УК «Альянс. Венчурный бизнес»» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.venture-buz.ru/energetika-energosberegenie/44-piezote](http://www.venture-buz.ru/energetika-energosberegenie/44-piezote)