

УДК 621.311.21

Н.Н. Сапига, П.Ф. Буданов, Е.Н. Юкова

Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

## ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*Рассмотрены характеристики и конструкции отечественных и зарубежных пьезоэлектрических акселерометров, основанных на различных физических принципах для измерения параметров вибрации и предложена математическая модель биморфного пьезоэлектрического преобразователя с чувствительным элементом ППА – 9, которая позволяет оценить чувствительность преобразователей данного типа с учётом ряда допущений. Получено уравнение выходного напряжения и безразмерной чувствительности акселерометра типа ППА – 9. Для обеспечения наибольшей чувствительности преобразователя толщину металлического и пьезоэлектрического диска необходимо выбирать из условия, что отношение этих толщин приблизительно составляет 0,4 и более высокий потенциал располагается в центральной части диска.*

**Ключевые слова:** биморфный, пьезоэлемент, чувствительность, модуль.

### Введение

**Постановка проблемы и анализ литературы.**  
Для измерения характеристик вибрации узлов статора

генератора электростанций широкое применение нашли пьезоэлектрические преобразователи типа ППА-9 [1], основные характеристики которых приведены в табл. 1, а конструкция показана на рис. 1.

Таблица 1  
Характеристики пьезоэлектрического преобразователя

Параметры преобразователя	Числовое значение (ед.изм.)
Коэффициент преобразования на частоте 50 Гц, не менее	$20 \pm 3, \frac{\text{мВ(пик)}}{\text{мс}^{-2}}$
Частота собственных колебаний закрепленного преобразователя, не менее	2,5, кГц
Емкость с кабелем, не менее	2000, пФ
Рабочий диапазон частот при входном сопротивлении измерительного прибора 40 Мом, не менее	20...800, Гц
Диапазон температур	от -40 до +80, С
Наибольшая относительная влажность	100 %
Дополнительная ошибка $\text{мс}^{-2}$ при действии магнитного поля частотой 50 Гц и напряжённостью: $2000 \text{ А}^{-1}$ , не более; $8000 \text{ А}^{-1}$ , не более	0,01
	0,15
Длина выводного кабеля	2, м
Размеры	Ф34x21, мм
Масса без кабеля	0,043 кг

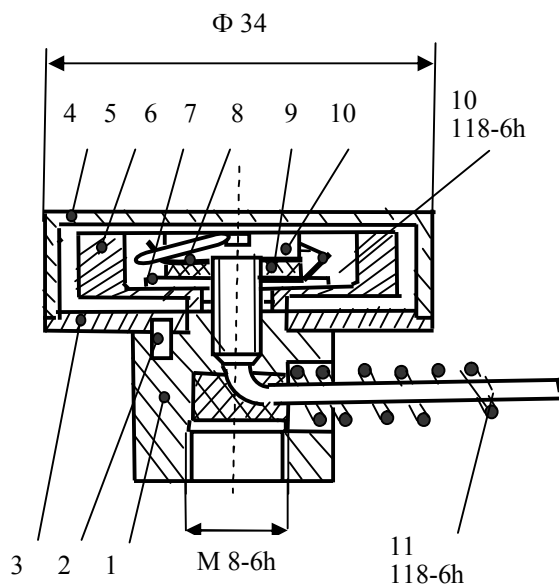


Рис. 1. Конструкция ППА-9: 1 – основание; 2 – упор; 3 – дно; 4 – крышка; 5 – упругий элемент; 6 – пьезо-керамическое кольцо; 7, 10 – выводной лепесток; 8 – изолятор; 9 – винт; 11 – кабель

Пьезоэлектрический акселерометр, является одним из лучших датчиков, для измерения параметров вибрации и практически полностью вытеснил преобразователи, основанные на других физических

принципах [2]. Это следует из свойств пьезоэлектрических акселерометров.

Широко известны пьезоэлектрические акселерометры фирм “Kistler Instrumente AG”, “Briel&Kjer”.

В зависимости от схемы измерения известны две системы датчиков фирмы “Kistler Instrumente AG”: пьезоэлектрическая и мезотропная.

В пьезоэлектрической системе собственно в датчике находится пьезоэлемент и инерционная масса. Датчик с высоким выходным сопротивлением с помощью малозумящего кабеля соединяется с зарядовым усилителем. В пьезотронной системе миниатюрный преобразователь полного сопротивления встроено в датчик. Для питания и формирования сигнала для обработки данных измерения необходим пьезотронный элемент связи. При этом датчик имеет низкоомный электрический выход (специальных кабелей не требуется). Обладая высокими характеристиками, акселерометры этих фирм вместе с тем имеют ряд недостатков, среди которых сравнительная сложность конструкции, требующая индивидуальной доводки и, как правило, высокая цена.

Одной из основных характеристик преобразователей является чувствительность.

**Цель статьи:** построение математической модели чувствительного элемента ППА – 9 для оценки чувствительности пьезоэлектрического преобразователя.

## Основной материал

Как видно из рис. 1, чувствительный элемент ППА-9 по конструкции принадлежит к асимметричным биморфным пьезоэлементам.

Асимметричные биморфные пьезоэлементы состоят из металлической пластины с приклеенным к ней поляризованным по толщине плоским пьезоэлементом и отличаются более простой технологией изготовления и большей механической прочностью.

Для чувствительного элемента (рис. 2), состоящего из склеенных между собой металлического и пьезоэлектрического дисков радиусом  $R$  и  $r$  соответственно, предлагается цилиндрическая система координат, ось  $OZ$  которой совпадает с осью двухслойного диска.

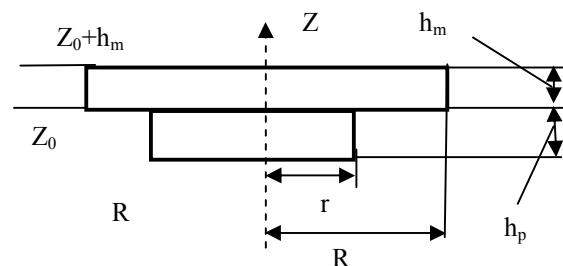


Рис. 2. Асимметричный биморфный элемент

Относительно поверхности приведения  $z = 0$  координаты поверхности раздела обозначим соответственно  $z_0$ ;  $z_1 = z_0 + h_p$ ;  $z_2 = z_0 + h_m$ .

Под действием гармонической нагрузки  $p \cdot e^{j\omega t}$  ( $p = \text{const}$ ), приложенной нормально, на разомкнутых электродах возникает напряжение  $U_x \cdot e^{j\omega t}$ . Для построения математической модели осесимметричных колебаний асимметричного биморфа, авторами предложено пренебречь толщиной клеевого покрытия и принять кинематические гипотезы, задающие закон изменения перемещений по толщине двухслойного диска, который определяется выражением (1):

$$\left. \begin{aligned} u_r(r, z) &= u(r) + z \cdot \psi(r); \\ u_z(r, z) &= \bar{\omega}(r), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $u$  и  $\bar{\omega}(r)$  – тангенциальное и нормальное смещение исходной поверхности;  $\psi$  – угол поворота нормали.

Как известно [2], для компонент тензора деформации, можно записать в виде выражения (2):

$$\left. \begin{aligned} e_{rr} &= \varepsilon_r + z \cdot x_r; & e_{\theta\theta} &= \varepsilon_\theta + z \cdot x_\theta; \\ e_{rz} &= \varepsilon_{rz}; & e_{zr} &= \varepsilon_{rz}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{du}{dr}; & \varepsilon_\theta &= \frac{u}{r}; & \varepsilon_\theta &= \frac{u}{r}; & x_\theta &= \frac{\psi}{r}; \\ 2e_{rz} &= \frac{d\bar{\omega}}{dr} + \psi. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Распределение потенциала по толщине пьезокерамического диска аппроксимируем квадратичной зависимостью, которая применяется в теории однородных пьезокерамических оболочек с электродированными поверхностями и определяется выражением (4):

$$\bar{\phi}(r, z) = \frac{U_x}{h_p} z + \frac{3}{2} \left[ 1 - \frac{4(z)^2}{h_p^2} \right] \cdot \Phi(r), \quad (4)$$

где  $\bar{z}$  – координата, отсчитываемая от срединной поверхности пьезокерамического диска.

Если обозначить расстояние между этой поверхностью и исходной поверхностью биморфа  $b = z_0 - \frac{h_p}{2}$ , то выражение (4) можно переписать в системе координат, нормально связанной с исходной поверхностью в виде выражения (5):

$$\bar{\phi}(r, z) = \frac{U_x}{h_p} (z - b) + \frac{3}{2} \left[ 1 - \frac{4(z - b)^2}{h_p^2} \right] \cdot \Phi(r). \quad (5)$$

Тогда для составляющих вектора напряжённости электрического поля в пьезокерамическом диске имеем выражения (6):

$$\left. \begin{aligned} E_r(r, z) &= f(z) E_r^{(0)}(r); \\ E_r(r, z) &= E_r^{(0)}(r) + (z - b) E_z^{(1)}(r); \\ f(z) &= \frac{3}{2} \left[ 1 - \frac{4(z - b)^2}{h_p^2} \right], \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\text{где } E_r^{(0)} = -\frac{d\Phi}{dt}; \quad E_z^{(0)} = -\frac{V_x}{h_p}; \quad E_z^{(1)} = -\frac{12}{h_p^2} \Phi.$$

Для вывода уравнений колебаний, электростатики и естественных граничных условий, авторами было предложено использовать обобщённый принцип Гамильтона.

Как известно [2], выражение (7) для неизвестной разности потенциалов может быть найдено с использованием соотношений (2) – (6):

$$U_x = \frac{1}{d_{31}} \cdot \frac{K_p^2}{1 - K_p^2} \cdot \frac{h_p}{R} \cdot \left[ u(r) - h_p \left( \gamma_0 - \frac{1}{2} \right) \bar{\omega}'(R) \right], \quad (7)$$

где  $d_{31}$  – пьезомодуль, который для конкретных материалов и конструкции может быть вычислен по следующей формуле:

$$d_{31} = \sqrt{8,3 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1}{r^2 \cdot \rho} \cdot \frac{\Delta f}{f_p^3} \varepsilon},$$

где  $\Delta f = f_a - f_p$ ,  $f_a$  – антирезонансная частота, Гц;  $f_p$  – резонансная частота, Гц;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала, которая может быть вычислена по формуле:  $\varepsilon = (3,6t/r^2) \cdot C \cdot 10^{-10}$ , где  $t$  – толщина, м;  $C$  – ёмкость, Ф;  $K_p$  – коэффициент электро-механической связи;  $\gamma_0 = (\alpha - \beta^2) / (2 \cdot (\alpha + \beta^2))$ ,  $\alpha = s_{11}^m / s_{11}^p$ ;  $\beta = h_m / h_p$ .  $s_{11}$  – податливость при постоянном электрическом поле.

Определив  $K_p$  по графику, приведенному в [3], можно  $d_{31}$  определить более точно по формуле:

$$d_{31} = \frac{0,57 \cdot K_p}{r \cdot f} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}.$$

Таким образом, выходная разность потенциалов выражается через значения тангенциального смещения исходной поверхности и угла поворота на краю диска ( $r = R$ ). Очевидно, что в случае жёстко заземленного края разность потенциалов не возникает.

Безразмерная чувствительность  $\bar{M}$ , как известно [2], при следующем допущении для коэффициента Пуассона  $\nu_p = \nu_m = \nu$ , определяется по формуле (8):

$$\bar{M} = \frac{U_x}{p} \cdot \frac{d_{31}}{R \cdot s_{11}^p \cdot (1 - \nu^2)}. \quad (8)$$

Отношения толщин металлического и пьезокерамического дисков определяется коэффициентом  $\beta$ .

Расчёты выполняются в дорезонансном диапазоне на безразмерной частоте  $\Omega = 0,0179$  для следующих физико-механических и геометрических параметров преобразователя:

$$\begin{aligned} S_{11}^p &= 15,2 \cdot 10^{-12} \frac{\text{М}^2}{\text{Н}}; & S_{11}^m &= 9,9 \cdot 10^{-12} \frac{\text{М}^2}{\text{Н}}; \\ \varepsilon_0 &= 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{Н}}; & d_{31} &= -100 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н}}; \\ \rho_p &= 7,74 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{М}^3}; & \rho_m &= 8,3 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{М}^3}; & R &= 9,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \end{aligned}$$

На рис. 3 показана залежність безрозмірної чутливості  $\bar{M}$  від відношення товщин металічного і п'єзокерамічного дисків  $\beta$ .

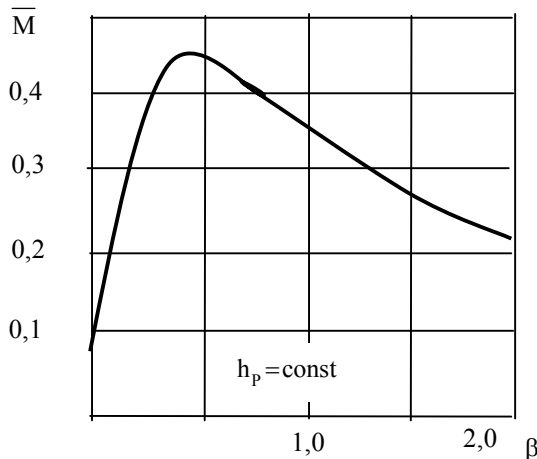


Рис. 3. Залежність безрозмірної чутливості  $\bar{M}$  від коефіцієнта  $\beta$

Из графика видно, что чувствительность  $\bar{M}$  имеет максимум при  $\beta \approx 0,4$ , т.е. при обеспечения наибольшей чувствительности преобразователя  $\bar{M}$  толщину металлического диска необходимо выбирать из условия ( $h_m \approx 0,4h_p$ ).

Приведенная зависимость не содержит информации о распределении деформации и электрического потенциала по радиусу преобразователя. Надёжный результат, по мнению авторов, может быть получен экспериментально [2]. Для экспериментов использовался асимметричный биморфный преобразователь с металлическим диском из стали 40X толщиной 0,15мм и  $\Phi 32$ мм. Пьезодиск из пьезокерамики ЦТС-19 толщиной 0,2мм и диаметром  $\Phi 24$ мм приклеен к металлическому диску соосно. В результате эксперимента получено распределение потенциала по диаметру, как показано на рис. 4. Из графика на рис. 4 следует, что максимальный потенциал  $U$ , находится в центральной части пьезодиска.

### П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Н.Н. Сапига, П.Ф. Буданов, Е.Н. Юкова

*Розглянуті характеристики і конструкції вітчизняних і зарубіжних п'єзоелектричних акселерометрів, ґрунтованих на різних фізичних принципах для виміру параметрів вібрації і запропонована математична модель биморфного п'єзоелектричного перетворювача з чутливим елементом ІПА-9, яка дозволяє оцінити чутливість перетворювачів цього типу з урахуванням ряду допущень. Отримано рівняння вихідної напруги і безрозмірної чутливості акселерометра типу ІПА-9. Для забезпечення найбільшої чутливості перетворювача товщину металевого і п'єзоелектричного диска необхідно вибирати з умови, що відношення цієї товщини приблизно складає 0,4 і більш високий потенціал розташовується в центральній частині диска.*

**Ключові слова:** биморфний, п'єзоелемент, чутливість, модуль.

### PIEZOELECTRIC TRANSFORMER FOR GENERATORS POWER-STATIONS

N.N. Sapiga, P.F. Bydanov, E.N. Yukova

*Descriptions and constructions are considered home and foreign piezoelectric accelerometer based on different physical principles for measuring of parameters of vibration and the mathematical model of bimorph piezoelectric transducer offers with a pickoff ІПА-9, that allows to estimate the sensitiveness of transformers of this type taking into account the row of assumptions. Equalizations of output tension and dimensionless sensitiveness of accelerometer of type are got ІПА-9. For providing of most sensitiveness of transformer the thickness of metallic and piezoelectric disk must be chosen from a condition, that a relation of these thicknesses approximately is 0,4 and higher potential is situated in central part of disk.*

**Keywords:** bimorph, piezoelectric, sensitiveness, module.

### Выводы

1. Получено уравнения выходного напряжения и безрозмерной чувствительности акселерометра типа ІПА – 9.

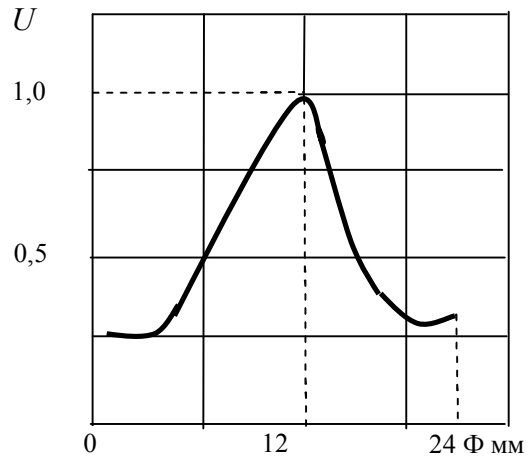


Рис. 4. Распределение потенциала  $U$  относительно диаметра  $\Phi$  пьезодиска

2. Для обеспечения наибольшей чувствительности преобразователя, толщину металлического диска, необходимо выбирать из условия, что бы более высокий потенциал располагался в центральной части диска.

### Список литературы

1. Преобразователи виброизмерительные пьезоэлектрические типа ІПА – 6, ІПА -9, ІПА 10В модели 76000,76001,76002, Техническое описание и инструкция по эксплуатации 76000,000ТО. – 31 с.
2. Шарпов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарпов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарпова; под ред. В.М. Шарпова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
3. Глозман И.А. Пьезокерамика / И.А. Глозман. – М., 1972. – 272 с.

Поступила в редколлегию 24.05.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.І. Канюк Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.