

УДК 621.317.084.2

**ГРАДУИРОВКА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ  
ПЬЕЗОДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ  
ВНУТРИ ТВЕРДЫХ СПЛОШНЫХ СРЕД**

*д-р техн. наук В.И. ЗУБЦОВ, А.Н. ЯГУБКИН*  
*(Полоцкий государственный университет);*  
*Е.В. ЗУБЦОВА*

*(Минский высший государственный колледж гражданской авиации)*

*Реальная функция преобразования датчика будет нелинейной. Физический смысл этой нелинейности заключается в изменении чувствительности датчика при изменении измеряемой величины. Для оценки погрешностей датчика, связанных с нелинейностью его преобразования, наиболее часто используют аппроксимацию реальной функции преобразования отрезком прямой линии. При этом задача проведения аппроксимирующей прямой через ряд экспериментальных точек может быть успешно решена, например, методом наименьших квадратов. По полученным экспериментальным данным определяли средние значения выходной величины при нагружении и разгрузке. Эти данные затем использовали для расчета погрешностей датчиков относительно аппроксимирующей функции линейной зависимости, которая включает в себя действительные значения физической величины. Иными словами, по экспериментальным значениям входных и выходных величин рассчитываются чувствительность датчика  $A$ , представляющая собой тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой к оси абсцисс, и постоянная величина  $B$ , представляющая собой точку пересечения этой прямой с осью ординат.*

**Введение.** Измерение механических напряжений *insitu* твердых сплошных сред – сложная задача, имеющая большое практическое значение с точки зрения определения срока службы изделий в различных отраслях промышленности, а также представляющая большой интерес для современной науки и техники.

Широко используемые ультразвуковые и другие методы дают недостаточную для практических целей точность измерения механических напряжений. Необходимо непосредственное измерение механических напряжений внутри контролируемого объекта для более точного и надежного определения запаса прочности конструкции материалов и изделий из них. С этой целью разработаны пьезодатчики статических механических напряжений типа ППН [1], модули упругостей которых находятся в широком диапазоне  $5 \cdot 10^3 - 10^5$  МПа. Это дает возможность использовать конкретную модификацию датчика в зависимости от жесткости контролируемого объекта, с целью повышения точности измерений, поскольку известно, что чем ближе совпадают по жесткости контролируемая среда и помещенный в неё датчик, тем точнее измерение.

**Основная часть.** Большое значение для разработки совершенных конструкций датчиков и получения надёжных экспериментальных данных имеет правильная методика и техника градуировки, а также последующая обработка данных [2].

Для определения метрологических показателей датчиков применена градуировка «методом 66 точек». Градуировка состоит из шести последовательных циклов, каждый из которых заключается в увеличении и снижении нагрузки теми же ступенями.

Реальная функция преобразования датчика будет нелинейной. Физический смысл этой нелинейности заключается в изменении чувствительности датчика при изменении измеряемой величины. Для оценки погрешностей датчика, связанных с нелинейностью его преобразования, наиболее часто используют аппроксимацию реальной функции преобразования отрезком прямой линии. При этом задача проведения аппроксимирующей прямой через ряд экспериментальных точек может быть успешно решена, например, методом наименьших квадратов.

Разработана методика метрологических исследований датчиков типа ППН, которая заключается в следующем. Определение метрологических характеристик датчиков проводили путем расчета погрешностей по данным экспериментальных исследований при постепенном повышении механических напряжений на датчиках и последующем их снижении.

Схема градуировочной установки приведена на рисунке 1.

По полученным экспериментальным данным определяли средние значения выходной величины при нагружении и разгрузке. Эти данные затем использовали для расчета погрешностей датчиков относительно аппроксимирующей функции линейной зависимости, которая включает в себя действительные значения физической величины.

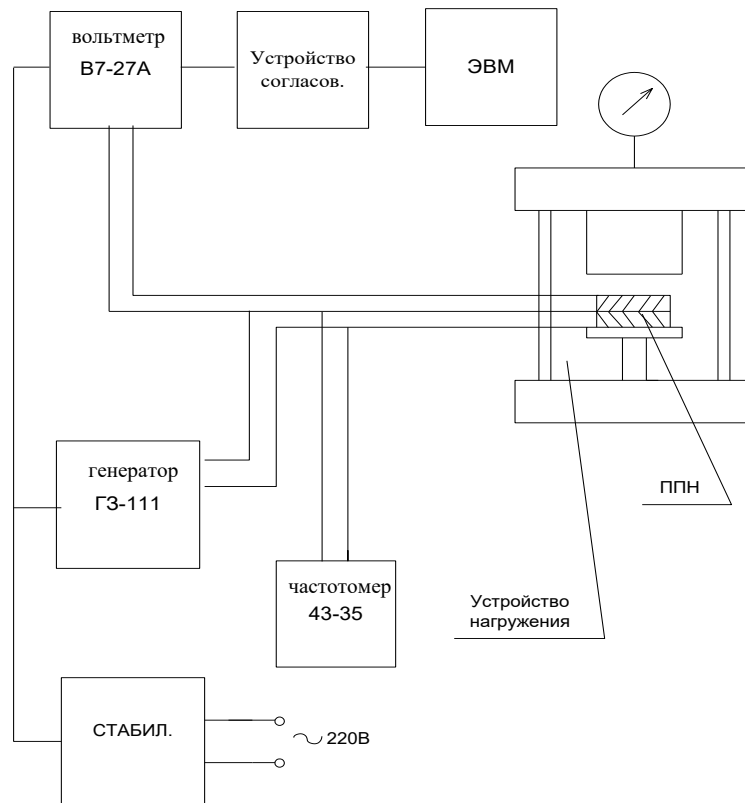


Рис. 1. Схема градуировочной установки

Уравнение этой аппроксимирующей функции в общем случае имеет вид:  $U = AT + B$ , или в обозначениях прямоугольной системы координат:

$$Y = AX + B. \quad (1)$$

Здесь  $A$  и  $B$  – коэффициенты, являющиеся функциями входной величины и других влияющих факторов.

С точки зрения влияния на результирующую точность измерения  $A$  представляет собой погрешность чувствительности датчика,  $B$  – погрешность нуля;  $U$  – электрическое напряжение – выходная величина датчика;  $T$  – механическое напряжение (входная величина).

Как уже упоминалось выше, в связи с тем, что реальная функция преобразования нелинейная, возникают погрешности измерений, абсолютные значения которых равны

$$\Delta = Ax_i + B - y_i, \quad (2)$$

где  $x_i$  – эталонное значение измеряемого параметра, задаваемого градуировочным устройством;  $y_i$  – измеряемое значение выходного сигнала датчика, которое отличается от значения  $y$  аппроксимирующей прямой.

То есть возникает разброс между значениями, полученными экспериментально и теоретически (расчетными).

В теории случайных величин характеристикой рассеяния (разброса) значений случайной величины служит дисперсия  $\sigma^2$ , положительную величину которой  $+\sqrt{\sigma^2} = +\sigma$  называют среднеквадратическим отклонением и обозначают  $\tilde{\sigma}$ .

Принимая закон распределения измеряемой величины  $X_i$  в рабочем диапазоне равномерным, выражение дисперсии запишется в виде:

$$\sigma = 1/n \sum_0^n (Ax_i + B - y_i)^2, \quad (3)$$

где  $n$  – число точек на характеристике преобразования.

Минимизируя  $\sigma$  на основании положения теории погрешностей (сумма погрешностей отдельных измерений данной серии стремится к нулю), дифференцируя выражение (1) по  $A$  и  $B$  и решая получен-

ную при этом систему уравнений относительно  $A$  и  $B$ , получаем параметры аппроксимирующей линии регрессии (4):

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{n \cdot \sum_1^n X_i Y_i - \sum_1^n X_i \cdot \sum_1^n Y_i}{n \cdot \sum_1^n X_i^2 - \left(\sum_1^n X_i\right)^2}; \\ B &= \frac{\sum_0^n y_i \sum_0^n x_i^2 - \sum_0^n y_i x_i \sum_0^n x_i}{(n+1) \sum_0^n x_i^2 - \left(\sum_0^n x_i\right)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Иными словами, по экспериментальным значениям входных и выходных величин рассчитываются чувствительность датчика  $A$ , представляющая собой тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой к оси абсцисс, и постоянная величина  $B$ , представляющая собой точку пересечения этой прямой с осью ординат.

С учетом [3, 4] проведены метрологические исследования пьезодатчиков механических напряжений типа ППН. В таблице 1 [1, 2] приведены следующие параметры погрешности 2-х модификаций датчиков:  $\Delta c$  – систематическая составляющая;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение случайной составляющей;  $b$  – вариация выходного сигнала;  $\delta$  – относительная погрешность.

На рисунках 2, 3 представлены градуировочные кривые, представляющие собой зависимости выходной величины (электрического напряжения  $U$ , В, измеряемого вольтметром) от входной (механической нагрузки  $T$ , МПа, создаваемой устройством нагружения), рис. 1.

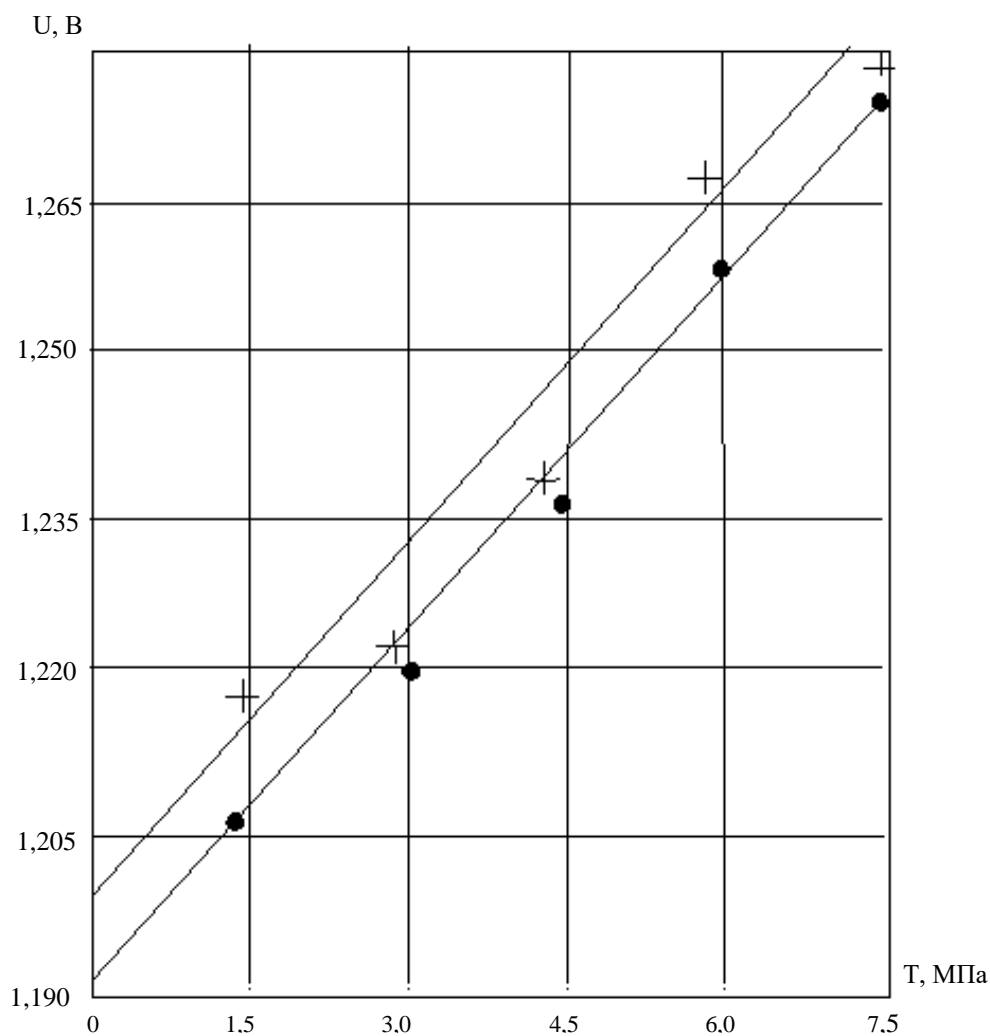
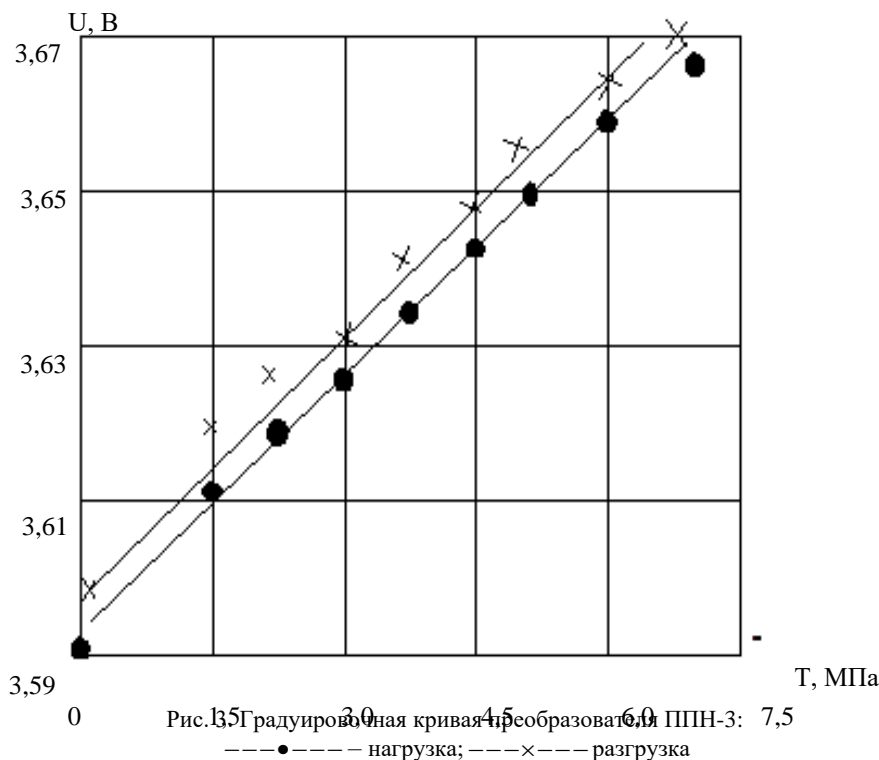


Рис. 2. Градуировочная кривая преобразователя ППН-1:  
 ----●---- нагрузка; ----×---- разгрузка



**Заключение.** Градуировка датчиков, а также последующая обработка полученных данных позволила установить увеличение чувствительности за счет конструктивных особенностей чувствительного элемента и точности измерения путем подбора модификации ППН в зависимости от жесткости контролируемой среды [1], а также разработать методику метрологических исследований пьезодатчиков контроля напряжённого состояния внутри деформируемых сред. Определение метрологических характеристик датчиков проводили путем расчета погрешностей по данным экспериментальных исследований при постепенном повышении механических напряжений на датчиках и последующем их снижении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зубцов, В.И. Пьезоэлектрический контроль прочности / В.И. Зубцов. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 147 с.
2. Зубцов, В.И. Методика градуировки и метрологических исследований пьезодатчиков механических напряжений / В.И. Зубцов // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2002. – № 12. – С. 38 – 40.
3. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений: ГОСТ 8.009-84. – Введ. 01.01.86. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. – 29 с.
4. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Метрологическая аттестация средств измерений: СТБ 8004-93. – Введ. 01.07.94. – Минск: Минский центр стандартизации и метрологии, 1994. – 26 с.

Поступила 19.11.2010

#### GRADUATION AND MATHEMATICAL PROCESSING OF MEASURING DATA PIEZOSENSORS OF CONTROL OF MECHANICAL PRESSURE IN FIRM CONTINUOUS ENVIRONMENTS

V. ZUBZOV, A. YAGUBKIN, E. ZUBZOVA

*Real function of transformation of the gage will be nonlinear. The physical sense of this nonlinearity consists in change of sensitivity of the gage at change of the measured size. For an estimation of errors of the gage connected with nonlinearity of its transformation, most often use approximation of real function of transformation by a straight line piece. Thus the problem of carrying out of an approximating straight line through a number of experimental points can be successfully solved, for example, a method of the least squares. On the received experimental data defined average values of target size at stressing and destressing. This data then used for calculation of errors of gages concerning approximating function of linear dependence which includes the valid values of physical size. Differently, on experimental values of entrance and target sizes pay off sensitivity of the gage And, representing a tangent of angle of an inclination of an approximating straight line to an axis of abscissas and a constant  $I_n$ , representing a point of intersection of this straight line with an axis of ordinates.*