

О. С. Филатова

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДИНАМИЧЕСКИХ
ДАВЛЕНИЙ В ГАЗООБРАЗНОЙ СРЕДЕ
НА УДАРНОЙ ТРУБЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

O. S. Filatova

**DETERMINATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS
OF PIEZOELECTRIC SENSORS OF DYNAMIC PRESSURES
IN GAS-MEDIUM ON THE SHOCK TUBE OF HIGH PRESSURE**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Решается задача определения динамических характеристик пьезоэлектрических датчиков динамических давлений в газообразной среде на ударной трубе высокого давления. Целью работы является разработка прямого метода оценки динамических характеристик пьезодатчиков путем регистрации реакции датчика на перепады давления газа с дальнейшим программным расчетом амплитудно-частотной характеристики и экспериментальным определением периода и собственной частоты колебаний датчика. *Материалы и методы.* Для решения поставленной задачи используется экспериментальная установка, основу которой составляет ударная труба высокого давления, формирующая единичные ступенчатые воздействия, поступающие на вход датчика, установленного в ее торце. Расчет амплитудно-частотной характеристики датчика проводится программным способом на основе информации об экспериментальной переходной характеристике. *Результаты и выводы.* Представлена методика определения динамических характеристик пьезоэлектрических датчиков в воздушной среде на ударной трубе высокого давления. Проведен программный расчет амплитудно-частотной характеристики по данным о переходной характеристике. Экспериментально определены значения периода и частоты собственных колебаний пьезоэлектрических датчиков. Предложен метод, позволяющий уменьшить погрешность при проведении измерений динамических процессов.

A b s t r a c t. *Background.* The problem of determining the dynamic characteristics of piezoelectric sensors of dynamic pressures in a gas-medium on a high-pressure shock tube is solved. The aim of this work is to develop a direct method for estimating the dynamic characteristics of piezoelectric sensors by registering the sensor response to gas pressure drops with further software calculation of the amplitude-frequency characteristic and experimentally determining the period and natural frequency of the sensor oscillations. *Materials and methods.* To solve this problem, an experimental setup is used, which is based on a high-pressure shock tube that forms single step influences that come to the input of a sensor installed at its end. The calculation of the amplitude-frequency characteristics of the sensor is carried out in a software way based on information about the experimental step response. *Results and conclusions.* A method for determining the dynamic characteristics of piezoelectric sensors in air on a high-pressure shock tube is presented. A software calculation of the amplitude-frequency characteristic according to the data on the step response is carried out. The values of the period and the natural frequency of piezoelectric sensors were experimentally determined. The proposed method allows to reduce the error when measuring dynamic processes.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пьезоэлектрический датчик, переходная характеристика датчика, динамическая характеристика датчика, ударная труба высокого давления, амплитудно-частотная характеристика датчика, собственная частота датчика.

Key words: piezoelectric sensor, step response of the sensor, dynamic response of the sensor, high-pressure shock tube, amplitude-frequency response of the sensor, natural frequency of the sensor.

Введение

Абсолютное большинство датчиков характеризуется как статическими, так и динамическими характеристиками (ДХ). Статические характеристики дают оценку параметрам датчика в установившемся состоянии. По ним определяют порог чувствительности, коэффициент преобразования и т.д. Динамические характеристики датчика проявляются в том, что на его выходной сигнал влияют значения входного сигнала и любые изменения этих значений во времени. ДХ оценивают показатели качества переходных процессов, к числу которых относят: время переходного процесса, дающее представление о быстродействии датчика; перерегулирование, показывающее, на сколько динамическая ошибка больше по сравнению с установившимся состоянием; степень колебательности и т.д.

Потребность в измерительных устройствах с наименьшими искажениями выходного сигнала порождает повышенный интерес к оценке динамических характеристик датчиков, поскольку и заказчики, и разработчики заинтересованы в средствах измерения с такими ДХ, при которых при известном характере входного сигнала динамические погрешности не превосходили бы допустимых значений. Именно поэтому необходимы новые и усовершенствованные методы их оценки.

Выделяют следующие методы определения ДХ датчиков:

- экспериментальный;
- аналитический;
- экспериментально-аналитический.

Экспериментальные методы реализуются с помощью прямых методов определения ДХ средств измерений (СИ) и требуют использования системы или установки для проведения соответствующего эксперимента.

Аналитические методы предусматривают построение или разработку математической модели процессов, происходящих в СИ во время измерения. Как правило, это система дифференциальных уравнений, порядок которой зависит от степени детализации описания процессов, происходящих в СИ. Недостатками аналитических методов являются невысокая точность и достоверность определения ДХ СИ, вызванная невозможностью полного математического описания всех физических процессов, происходящих в исследуемом СИ в процессе его эксплуатации, поэтому аналитические методы применяются в основном для прогнозирования ДХ средства измерения на этапе его разработки и проектирования и (или) исследования поведения ДХ в зависимости от вносимых конструктивных изменений.

Наибольшее распространение получили экспериментально-аналитические методы определения ДХ СИ, которые используют соответствующее испытательное оборудование (систему или установку для экспериментального определения ДХ СИ) и методы обработки экспериментальных ДХ.

Учитывая, что датчик эксплуатируется в условиях воздействия различных сред (жидких, газообразных), возникает проблема оценки ДХ датчиков. В статье предложен один из экспериментально-аналитических методов определения ДХ датчиков в газообразной среде на ударной трубе высокого давления (УТВД).

Методика определения динамических характеристик пьезоэлектрических датчиков на ударной трубе высокого давления

На УТВД проводится определение переходной характеристики (ПХ) прямым методом – путем регистрации реакции датчика на перепад давления газа амплитудой до 6–7 МПа, при этом датчик установлен в торце УТВД.

По графику ПХ, получаемому в ходе испытаний, определяются предварительные значения периода T_0 и нулевой частоты f_0 датчика. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) рассчитывается на основе информации об экспериментальной ПХ, хранящейся на персональном компьютере (ПК). Важность определения АЧХ состоит в отображении относительного уменьшения выходного сигнала при увеличении его частоты. Как правило, для описания ДХ датчиков используется граничная частота, соответствующая снижению выходного сигнала на 3 дБ, показывая, на какой частоте происходит 30-процентное уменьшение выходного сигнала.

Схема испытательной установки приведена на рис. 1.

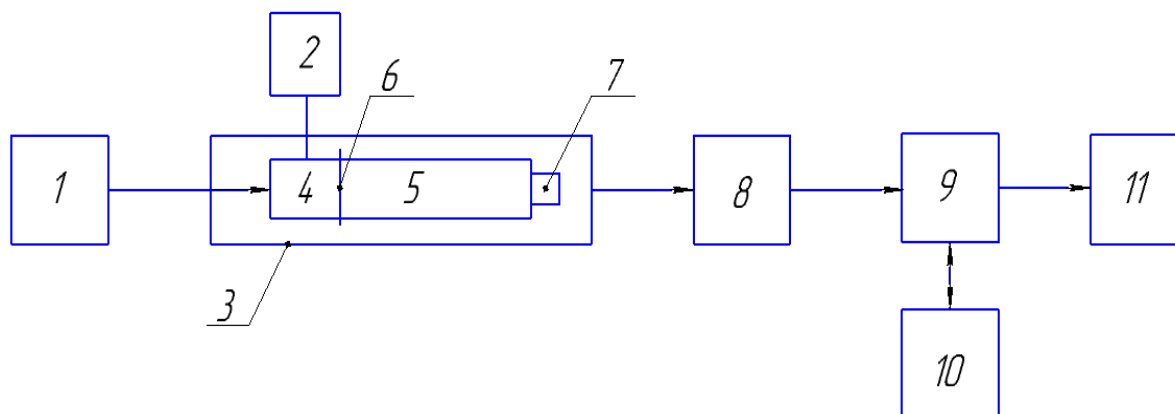


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – система подачи высокого давления воздуха; 2 – манометр; 3 – ударная труба высокого давления; 4 – камера высокого давления (КВД); 5 – камера низкого давления (КНД); 6 – мембрана; 7 – испытуемый датчик; 8 – усилитель; 9 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 10 – ПК; 11 – запоминающий осциллограф

В ходе испытаний регистрируются импульсные переходные характеристики (ИПХ) датчиков. УТВД формирует ступенчатое воздействие, реакцией на которое является переходная характеристика, описываемая следующим выражением:

$$h(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t \leq 0; \\ 1, & \text{если } t > 0. \end{cases}$$

Здесь $h(t)$ – переходная характеристика датчика.

Импульсная и переходная характеристики связаны интегральной зависимостью

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dh(t)}{dt} dt = h(t) = h(t) \Big|_{-\infty}^{\infty} = 1,$$

где $\delta(t)$ и $h(t)$ – импульсная и переходная характеристики датчика соответственно.

После нахождения ИПХ определяются значения периода T_0 и частоты f_0 их собственных колебаний. Графики переходных характеристик, полученных с испытуемого датчика ВТ 306 в ходе эксперимента, приведены на рис. 2, а, б.

Отклик пьезоэлектрических датчиков на ударную волну имеет сложный спектр. Он состоит из ряда низкочастотных и высокочастотных составляющих. Низкочастотные составляющие чаще всего не проявляются при определении АЧХ на пульсаторах и являются следствием волновых процессов в многослойной конструкции пьезоэлектрического датчика. Поэтому при определении рабочего диапазона частот датчика, предназначенного для измерения переменного пульсирующего давления, их не следует принимать во внимание и использовать только высокочастотные пики. Однако при измерении импульсных и ударно-волновых давлений низкочастотные пики следует учитывать при анализе измерительной информации или при определении рабочего диапазона частот.

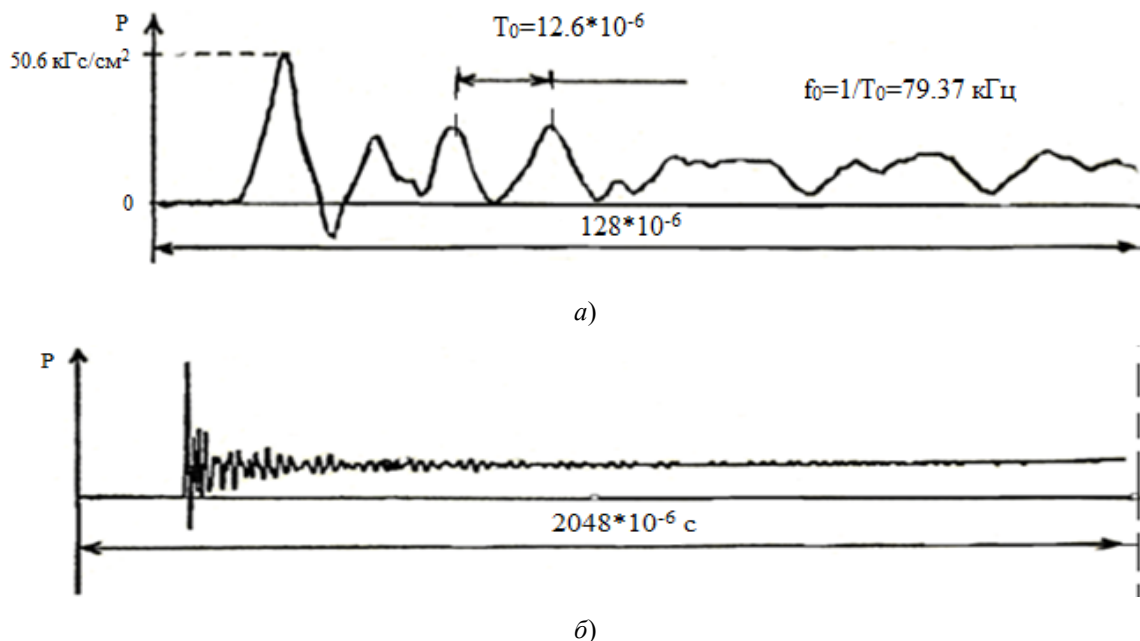


Рис. 2. Характеристики, снятые с испытуемого датчика ВТ 306 экспериментальным способом: а – полная реализация; б – начальный участок

Расчет АЧХ по полученным значениям ПХ проводится программным способом. Основу программного расчета составляет одно из положений теории линейных систем, согласно которому выходной сигнал системы может быть представлен как свертка входного сигнала и импульсной характеристики системы. В частотной области это соотношение преобразуется в произведение спектральных характеристик:

$$Y(f) = H(f)X(f). \quad (1)$$

Здесь $Y(f)$, $H(f)$, $X(f)$ – фурье-образы выходного сигнала $y(t)$, импульсной характеристики системы $h(t)$ и входного сигнала $x(t)$ соответственно.

Для определения значения частотной характеристики из выражения (1) выводится соотношение

$$G_{yy}(f) = |H(f)|^2 G_{xx}(f), \quad (2)$$

где $G_{yy}(f)$ и $G_{xx}(f)$ – спектральные плотности входного и выходного процессов; $H(f)$ – искомая частотная характеристика.

Выражение (2) дает простой алгоритм определения передаточной функции системы. Для этого достаточно взять в качестве входного сигнал с равномерным спектром в частотной области (или дельта-импульс во временной). Тогда частотный спектр выходного сигнала совпадет с частотным спектром исследуемого датчика.

Программа включает в себя сервисные операции по считыванию отсчетов ПХ, формированию массивов и т.д., вычислительные операции преобразования Фурье. Учитывая, что вместо непрерывного сигнала используются его цифровые отсчеты, в программу заложено обратное дискретное преобразование Фурье, определяемое выражением

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j \frac{2\pi}{N} kn},$$

где $n = 0, \dots, N-1$, N – количество значений сигнала, измеренных за период; x_n – измеренные значения сигнала в дискретных временных точках; X_k – комплексные амплитуды синусоидальных сигналов, слагающих исходные сигналы (обозначают одновременно амплитуду и фазу); k – частота k -й синусоиды, измеренная в колебаниях за период.

Программа предусматривает операции по формированию и выводу результатов расчета на дисплей и память ПК.

Заключение

Предложен метод определения динамических характеристик датчиков в газообразной среде на ударной трубе высокого давления с наименьшими затратами. Экспериментально получены переходные и частотные характеристики, а также частоты собственных колебаний датчиков. Определение ДХ пьезоэлектрических датчиков динамических давлений позволяет уменьшить погрешность при проведении измерений динамических процессов.

Библиографический список

1. *Авдеева, О. В.* Основы управления техническими системами (Теория линейных систем) : учеб. пособие / О. В. Авдеева, Д. В. Артамонов, А. Д. Семенов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – 246 с.
2. *Бушуев, О. Ю.* Экспериментальная оценка динамических характеристик тензопреобразователей давления / О. Ю. Бушуев, А. С. Семенов, А. Л. Шестаков // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. – 2011. – № 1. – С. 88–97.
3. *Мясникова, Н. В.* Система для исследования характеристик датчиков динамического давления / Н. В. Мясникова, А. П. Панов, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Контроль. Управление. – 2013. – № 4 (6). – С. 32–36.
4. *Бушуев, О. Ю.* Исследование динамических характеристик тензометрического преобразователя давления с целью диагностики его состояния / О. Ю. Бушуев, А. С. Семенов, А. О. Чернявский // Датчики и системы. – 2010. – № 4. – С. 53–68.
5. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления / К. И. Бастрьгин, А. А. Трофимов, А. С. Баранов, А. А. Громова, П. Н. Ефимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 20–28.

Филатова Ольга Сергеевна

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: avitel@mail.ru

Filatova Olga Sergeevna

master's degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.586.773

Филатова, О. С.

Определение динамических характеристик пьезоэлектрических датчиков динамических давлений в газообразной среде на ударной трубе высокого давления / О. С. Филатова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 43–47. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-7.