

УДК 53.087.92

Составные пьезотрансформаторные датчики уровня сыпучих материалов

В.Н. Седалищев, Р.В. Краев

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Composite Piezotransformer Level Sensors for Bulk Materials

V.N. Sedalishchev, R.V. Kraev

Altai State University (Barnaul, Russia)

Приведено описание принципов построения и особенностей функционирования составных пьезотрансформаторных датчиков (ПТД) уровня сыпучих материалов, применимых для работы в условиях высоких температур, химических и механических воздействий. Чувствительными элементами (ЧЭ) являются составные пьезоэлектрические трансформаторы (ПЭТ) с согласованными размерами. В зависимости от конструкции и назначения датчика ЧЭ может представлять собой колебательную систему с одной, двумя и более степенями свободы, систему с распределенными параметрами. Это позволяет использовать устройства такого типа в качестве сигнализаторов, а также для осуществления непрерывного контроля уровня сыпучих материалов в емкостях. Возбуждение механических колебаний в чувствительном элементе датчика и формирование выходных сигналов могут осуществляться по схемам с одним или двумя ПЭТ. При реализации первого варианта в качестве выходного сигнала датчика используется отношение выходных напряжений, снимаемых с одного ПЭТ на нормальных частотах синхронизации (НЧС) синфазных и противофазных колебаний в системе. При реализации второго варианта построения датчика используются выходные напряжения, снимаемые с двух ПЭТ на одной из НЧС. Реализация соответствующей схемы и способа формирования выходного сигнала датчика позволяет повысить метрологические и эксплуатационные характеристики измерительных устройств такого типа, расширить диапазон измерения и условия их эксплуатации.

Описан механизм чувствительности датчика, представлены результаты имитационного моделирования работы датчика, выработаны рекомендации по разработке и проектированию измерительных устройств такого типа.

Ключевые слова: датчик уровня сыпучих материалов, составной пьезотрансформатор, связанные колебания, системы с конечным числом степеней свободы, системы с распределенными параметрами, имитационное моделирование.

The paper presents the principles of construction and functioning of compound piezoelectric transformer sensors (PTS) for bulk materials. The studied PTS are suitable for high temperature, chemical, and mechanical applications. The sensing elements (SE) are piezoelectric composite transformers (PCT) with agreed dimensions. Depending on the construction and the intended use of the transducer, the PE can be an oscillating system with one, two, or more degrees of freedom or a system with distributed parameters. Therefore, it is possible to use these types of devices as alarm devices and perform continuous level control of bulk materials in containers. Excitation of mechanical vibrations in the sensitive element of the sensor and the formation of output signals can be carried out by the schemes with one or two PET. For the first variant, the ratio of output voltages taken from one PCT at normal synchronization frequencies (NSF) of in-phase and antiphase oscillations in the system is used as a transducer output signal. The second variant uses output voltages from two PTS at one of the NSF. Deployment of the appropriate scheme and the method of forming the sensor output signal allows increasing the metrological and operational characteristics of measuring devices of such types to extend the measurement range and operation conditions.

The sensitivity mechanism of the sensor is described, the results of simulation of sensor operation are presented, and recommendations on the development and design of measuring devices of this type are worked out.

Keywords: bulk material level sensor, compound piezoelectric transformer, coupled oscillations, systems with a finite number of degrees of freedom, systems with distributed parameters, simulation modelling.

DOI: 10.14258/izvasu(2022)1-09

Датчики уровня сыпучих материалов должны обладать высокой чувствительностью к измеряемому параметру и в то же время быть устойчивыми к сильным механическим и тепловым воздействиям. Используемые в настоящее время для этой цели оптические, микроволновые, ультразвуковые, емкостные, вибрационные и другие методы и средства измерения уровня сыпучих материалов в емкостях больших размеров не удовлетворяют в полной мере указанным требованиям. Причины, ограничивающие их применение, — запыленность, высокие температуры, налипание, абразивность, химическая активность рабочей среды. Отказ в работе датчиков уровня, например, в системах золоудаления тепловых электростанций приводит к переполнению бункеров, выходу из строя фильтров, в результате чего происходит загрязнение окружающей среды. Это обуславливает необходимость разработки новых средств измерения уровня сыпучих материалов [1–5].

Как показывает опыт практической эксплуатации, для работы в тяжелых условиях наиболее при-

менимы электромеханические датчики. Основными недостатками наиболее распространенных датчиков уровня сыпучих материалов камертонного типа являются малый диапазон рабочих температур, образование пустот в области чувствительного элемента, неприменимость для непрерывного контроля уровня сыпучего материала. В связи с этим актуальна задача разработки уровнемеров вибрационного типа, применимых для работы в тяжелых условиях.

В результате проведенных исследований было показано, что для измерения уровня сыпучих материалов могут быть использованы датчики на базе составных пьезоэлектрических трансформаторов (ПЭТ) [6]. Измерительные устройства такого типа имеют простую конструкцию, низкую стоимость, применимы для работы в тяжелых условиях, технологичны в изготовлении.

На рисунке 1 представлена конструкция одного из вариантов исполнения составного пьезотрансформаторного датчика (ПТД) уровня сыпучих материалов, применимого для работы в тяжелых условиях.

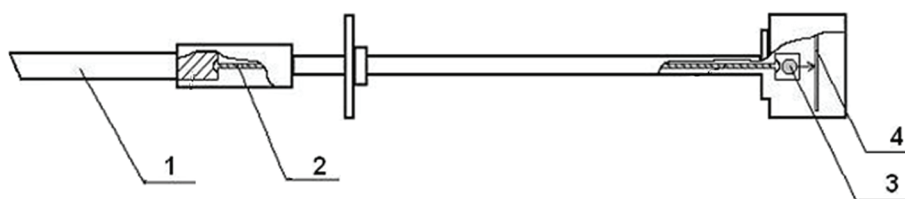


Рис. 1. ПТД сыпучих материалов с протяженным элементом связи: 1 — вибратор, 2 — звукопровод, 3 — ПЭТ, 4 — электронный блок

Чувствительный элемент (ЧЭ) такого датчика представляет собой плоскую металлическую пластину с закрепленным на ее поверхности дисковым пьезоэлектрическим трансформатором. Вибратор и элемент связи (звукопровод) имеют согласованные геометрические размеры, что обеспечивает установление в ЧЭ режиме стоячих волн.

Принцип работы датчика основан на применении трибоэффекта, заключающегося в реализации функциональной зависимости параметров колебаний вибратора от статического давления сыпучего материала на его поверхность, пропорционального его уровню в емкости. Преимуществом такого конструктивного исполнения датчика по сравнению с датчиками камертонного типа является то, что вибратор выполнен в виде пластины с согласованными размерами, совершающей продольные колебания. Это исключает возможность образования пустот в области контакта вибратора с рабочей средой и позволяет производить непрерывное измерение уровня сыпучего

материала в емкости. Очевидно, что точность измерений при этом невысока и зависит от физико-механических и трибологических характеристик сыпучего материала.

В датчике реализуются два механизма чувствительности, обусловленных зависимостью площади контакта поверхности вибратора с частицами сыпучего материала от измеряемого уровня. В результате изменения акустических потерь и контактной жесткости вибратора происходит соответствующее изменение амплитуд и частот связанных колебаний в чувствительном элементе датчика.

Механизм акусточувствительности датчика заключается в реализации функциональной зависимости выходного напряжения ПЭТ от степени согласования акустических импедансов контактирующих материалов и фактической площадью контакта вибратора с частицами среды, пропорциональной измеряемому уровню сыпучего материала (Н) [7]:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \cdot \frac{\rho_B c_B s_B}{\rho_c c_c s_\phi} \cdot A, \quad s_\phi = \varphi(H) \quad (1)$$

где s_B, s_ϕ — площадь рабочей поверхности вибратора и фактическая площадь контакта вибратора со средой; $\rho_c c_c, \rho_B c_B$ — акустические импедансы рабочей среды и вибратора; A — параметр, характеризующий механическую добротность и эффективность электро-механического преобразования ПЭТ; H — измеряемый уровень сыпучего материала.

Механизм тензочувствительности датчика обусловлен влиянием уровня сыпучего материала на контактную жесткость вибратора с частицами среды, что обуславливает изменение его парциальной частоты колебаний.

При расчете и проектировании измерительных устройств такого типа удобнее использовать не парциальные, а собственные частоты взаимосвязанных резонаторов. Это позволяет существенно упростить вид функциональных зависимостей и выполнение инженерных расчетов. Например, формула для определения нормальных частот синхронизации (НЧС) связанных колебаний в системе может быть представлена в виде:

$$\omega_{1,2} \approx \left(\frac{n_{01} + n_{02}}{2} \right) \cdot \left(1 \pm \sqrt{\xi^2 + \gamma^2} \right)^{0.5}, \quad (2)$$

где n_{01}, n_{02} — собственные частоты резонаторов; ω_1, ω_2 — НЧС синфазных и противофазных колебаний в системе; ξ — относительная расстройка собственных частот резонаторов; γ — коэффициенты связи между резонаторами.

Модулируемыми параметрами колебательной системы датчика в функции измеряемого уровня сы-

пучего материала могут выступать механическая добротность взаимосвязанных резонаторов (Q), относительная расстройка их собственных частот (ξ), коэффициент связи в системе (γ). Модуляция этих параметров в функции измеряемого воздействия обуславливает соответствующие изменения амплитуд, частот, фаз и других параметров связанных колебаний в системе. Использование отношения этих параметров в качестве выходного сигнала датчика позволяет существенно улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики измерительных устройств такого типа.

В частности, отношения амплитуд и частот связанных колебаний в системе может быть положено в основу создания логометрического (дифференциального) варианта датчика. При этом возбуждение механических колебаний в системе и съём выходных электрических сигналов может осуществляться по схеме с использованием как двух, так и одного ПЭТ. Применение схемы с двумя ПЭТ позволяет повысить надежность возбуждения колебаний на одних частотах и гашение колебаний на других частотах.

В составном ПЭТ степенями свободы могут являться не только резонаторы, но и типы связанных колебаний между ними. Это позволяет использовать в качестве выходного сигнала датчика отношение выходных напряжений, снимаемых с одного ПЭТ на НЧС синфазных и противофазных колебаний в системе. Что даст возможность повысить точность измерений, избавит от необходимости в подборе пар пьезоэлементов с идентичными характеристиками [7, 8].

Для аналитического описания функциональных зависимостей ПТД с амплитудным и частотным выходом могут быть использованы следующие упрощенные формулы:

$$\frac{U_{11}}{U_{21}} \approx \frac{\sqrt{(\xi)^2 + (\gamma)^2} + \xi}{\gamma}, \quad \frac{U_{11}}{U_{12}} \approx \frac{\sqrt{(\xi)^2 + (\gamma)^2} + \xi}{\sqrt{(\xi)^2 + (\gamma)^2} - \xi}, \quad \frac{\omega_1}{\omega_2} \approx \frac{1 + \sqrt{\xi^2 + \gamma^2}}{1 - \sqrt{\xi^2 + \gamma^2}} \quad (3)$$

$\frac{U_{11}}{U_{21}}$ — отношение выходных напряжений двух ПЭТ на одной НЧС;

$\frac{U_{11}}{U_{21}}$ — отношение выходных напряжений одного ПЭТ на двух НЧС;

$\frac{\omega_1}{\omega_2}$ — отношение НЧС синфазных и противофазных колебаний в системе.

Составные ПТД могут иметь достаточно сложные конструкции, состоящие из одного, двух и более ПЭТ, вибраторов и элементов связи между ними, в том числе системы с распределенными параметрами. Необходимо отметить, что в настоящее время существует потребность в многоэлементных датчиках, в датчиках с протяженными чувствительными элементами [9, 10].

На рисунке 2 представлены ПТД с одним (1, 2, 3) и двумя (4, 5, 6, 7) генераторами, включенными в фазе (4, 6) и в противофазе (5, 7), датчики с одним вибратором (1) и многоэлементные ПТД (2, 6, 7), датчики с протяженным элементом связи

(3, 4). Приведены их амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), показаны особенности изменения выходных напряжений составных ПЭТ различных конструкций при реализации механизмов акусто- и тензочувствительности датчика.

Варианты исполнения и схемы установки датчиков	АЧХ составного ПЭТ	
	акусточувствительность	тензочувствительность
<p>1</p>		
<p>2</p>		
<p>3</p>		
<p>4</p>		
	<p>5</p>	

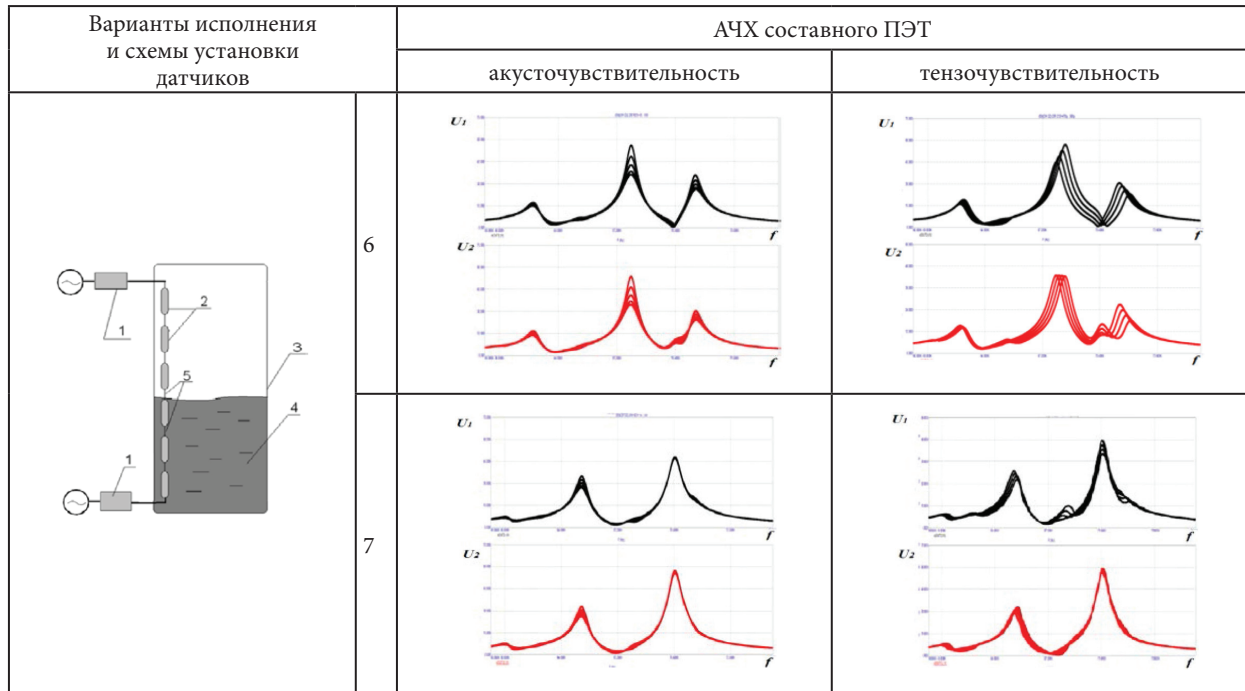


Рис. 2. Варианты конструктивного исполнения, схемы установки и АЧХ датчиков уровня сыпучих материалов на базе составных ПЭТ

ПТД с одноэлементными ЧЭ имеют плавно изменяющуюся выходную характеристику, но малый рабочий диапазон измерений. Многоэлементные датчики и датчики с протяженными ЧЭ имеют нелинейную, ступенчато изменяющуюся выходную

характеристику, но существенно больший рабочий диапазон.

На рисунке 3 представлен внешний вид системы контроля уровня сыпучих материалов на базе составных ПЭТ, предназначенной для систем золоудаления тепловых электростанций.



Рис. 3. Комплект ПТД уровня для системы контроля золоудаления на тепловой электростанции

Таким образом, описанные в работе датчики уровня сыпучих материалов на базе составных ПЭТ обладают высокой чувствительностью, простотой

конструкции, технологичностью изготовления, применимостью для работы в экстремальных условиях.

Библиографический список

1. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. М., 2007.
2. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации // Пьезоэлектрическое приборостроение ; в 3 т. Т. 3. Ростов н/Д., 2006.
3. Chih Kung Lee, Yu Hsiang Hsu, Wendy Wen-Hsin Hsiao, and Jeremy W. J. Wu "Electrical and mechanical field interactions of piezoelectric systems: foundation of smart-structure-based piezoelectric sensors and actuators, piezotransformers, and free-fall sensors", Proc. SPIE 5054, Smart Structures and Materials 2003: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies.
4. Sharapov V., Minaev I., Sotula Zh., Bazilo K., Kunitskaya L. Ed. Sharapov V. Piezoceramic transformers and sensors. Cherkassy: Vertical. 2010.
5. Sharapov V., Vladisauskas A., Bazilo K., Kunitskaya L., Sotula Zh. Methods of synthesis of piezoceramic transducers: spatial energy force structure of piezoelement. ISSN 1392-2114 Ultrasound. 2009 Vol.64. № 4.
6. Седалищев В.Н. Пьезотрансформаторные измерительные преобразователи : монография. Барнаул, 2015.
7. Sedalishchev V., Sergeeva Ya. Simulation of measuring transducers based on interconnected piezoresonators // X International Conference on High-performance computing systems and technologies in scientific research, automation of control and production (HPCST) 2020. Barnaul, 24–25 April 2020 / J. Phys. : Conf. Ser. Vol. 1615, article: 012030.
8. Sedalishchev V.N., Sergeeva Ia.S., Strahatov D.O. Simulation modeling of composite piezotransformer measuring transducer with differential output // XI International Conference on High-performance computing systems and technologies in scientific research, automation of control and production (HPCST) 2021. Barnaul, 21–22 May 2021. / J. Phys. : Conf. Ser. Vol. 2142, article: 012018.
9. Партс Я.А. Многочастотные пьезорезонансные датчики: принцип действия, способы построения, решаемые задачи // Нелинейный мир. 2009. № 5, т. 7.
10. Евдокимов Ю.К., Партс Я.А. Квазираспределенные пьезорезонансные датчики в промышленных системах измерения температуры // Мир измерений. 2010. № 3 (109).