

## Дифференциальный пьезотрансформаторный датчик вязкости жидких сред

*А.В. Бальков<sup>1</sup>, В.В. Белозерских<sup>1</sup>, В.Н. Седалищев<sup>1</sup>, Я.С. Сергеева<sup>1</sup>,  
Д.О. Страхатов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

<sup>2</sup>Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова (Барнаул, Россия)

## A Fluid Viscosity Sensor Based on a Differential Piezoelectric Transformer

*A.V. Balykov<sup>1</sup>, V.V. Belozerskikh<sup>1</sup>, V.N. Sedalichev<sup>1</sup>, Ya.S. Sergeeva<sup>1</sup>,  
D.O. Strakhatov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Altai State University (Barnaul, Russia)

<sup>2</sup>Polzunov Altai State Technical University (Barnaul, Russia)

Описаны устройство и принцип работы дифференциального пьезотрансформаторного датчика вязкости жидких сред с амплитудным выходом. Рассмотрены варианты исполнения колебательной системы датчика с одной, двумя и тремя степенями свободы. Предложена конструкция чувствительного элемента датчика, основанного на использовании связанных колебаний составных пьезотрансформаторов. Для исследования метрологических характеристик измерительных устройств такого типа были применены методы имитационного моделирования с использованием упрощенных эквивалентных электрических схем замещения колебательных систем первичных преобразователей. Показано, что рациональное использование соответствующих режимов связанных колебаний в первичных измерительных преобразователях позволяет улучшить метрологические характеристики измерительных устройств, расширить их функциональные возможности. В качестве критериев выбора оптимальных вариантов конструктивного и схемного исполнения датчиков использовались коэффициенты относительной чувствительности и эффективности измерительного процесса. Измерительные преобразователи, основанные на использовании связанных колебаний в сложных системах, характеризуются большим разнообразием вариантов конструктивного исполнения, расширенными функциональными возможностями, способны обеспечивать высокую чувствительность и эффективность измерительного процесса.

**Ключевые слова:** датчик вязкости, пьезотрансформатор, связанные колебания, дифференциальный метод измерения.

This paper presents a design and operating principle of a fluid viscosity sensor with an amplitude output based on a differential piezoelectric transformer. Sensors with one-, two-, and three-degree-of-freedom oscillation systems are investigated, and sensors design based on coupled oscillations of composite piezoelectric transformers is proposed. Simulation techniques with simplified electrical circuit equivalents of oscillation systems of primary transducers are utilized for studying metrological characteristics of the sensors. It is shown that rational use of coupled modes in primary transducers improves the metrological characteristics of the sensors and enhances their functionality. Coefficients of relative sensitivity and measurement efficiency provide the basis for evaluation of optimal design of sensors. There is a variety of optimal designs for transducers based on coupled oscillations that result in enhanced functionality, high sensitivity, and measurement efficiency.

**Key words:** coupled oscillations, viscosity sensor, piezoelectric transformers, differential measurement method.

На основе реализации резонансных режимов работы пьезоэлектрических преобразователей были разработаны и нашли широкое применение различные типы датчиков [1–7]. На базе кварцевых резонаторов создают в основном датчики с частотным выходом, а на основе пьезокерамических материалов — датчики с амплитудным выходом [2, 7]. Это связано с тем, что пьезокварц обладает более высокой механической добротностью и стабильностью характеристик, а также низкой чувствительностью к дестабилизирующим воздействиям. Пьезокерамические материалы имеют более высокие пьезомодули, но менее стабильны во времени и более чувствительны к воздействию различных факторов. Поэтому датчики на их основе менее точны по сравнению с пьезокварцевыми, но конструктивно проще и дешевле.

С целью повышения метрологических характеристик пьезокерамических датчиков, расширения их функциональных возможностей и области практического применения были проведены исследования по разработке нового поколения пьезокерамических датчиков с амплитудным выходом, основанных на модуляции связанных колебаний составных пьезотрансформаторов (МСК ПТД) [7]. В результате были разработаны и нашли практическое применение конструктивно простые, недорогие, надежные в работе высокочувствительные пьезотрансформаторные измерительные преобразователи статических усилий, давлений, микроперемещений, уровня сыпучих материалов, вязкости жидких сред и т. п. [7].

На рисунке 1 приведена структурная схема составного первичного измерительного преобразователя (ИП) вязкости, состоящего из пьезоэлектрического трансформатора, закрепленного на поверхности металлического вибратора. Чувствительный элемент датчика имеет согласованные размеры, что обеспечивает возбуждение в теле вибратора одного из обертонов продольной моды колебаний. Механизм чувствительности устройства основан на реализации функциональной зависимости выходного напряжения составного ПЭТ от величины вязкого трения поверхности вибратора с исследуемой средой.

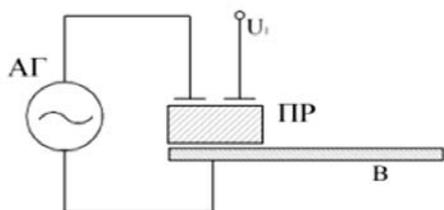


Рис. 1. Структурная схема МСК ИП на базе составного ПЭТ

Вибратор имеет малую толщину по сравнению с его длиной и шириной, что при возбуждении про-

дольной моды колебаний обеспечивает возможность измерения преимущественно сдвиговой вязкости жидких сред. При рабочей частоте датчика в пределах нескольких десятков кГц толщина увлекаемого слоя жидкости составляет десятые и сотые доли миллиметра. Поэтому изменение плотности исследуемой среды практически не влияет на результат измерения вязкости, так как масса увлекаемого слоя жидкости мала по сравнению с эквивалентной массой вибратора.

К достоинствам датчиков на базе составных пьезотрансформаторов можно отнести простоту конструкции, низкую стоимость, технологичность изготовления. Основным их недостатком является низкая точность измерения, обусловленная нестабильностью свойств используемых пьезоматериалов как во времени, так и под воздействием различных дестабилизирующих факторов.

С целью улучшения метрологических характеристик, расширения функциональных возможностей и области практического применения измерительных устройств такого типа были проведены исследования по оптимизации конструкции и режимов работы составных пьезотрансформаторных ИП.

На рисунке 2 приведены некоторые варианты конструктивного исполнения чувствительных элементов ИП на базе составных ПЭТ.

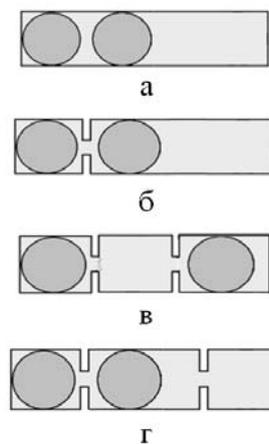


Рис. 2. Варианты конструктивного исполнения чувствительных элементов МСК ИП на базе составных ПЭТ с использованием связанных колебаний в системах с двумя (а, б) и тремя (в, г) степенями свободы

Необходимо отметить, что точное аналитическое описание режимов работы ИП с большим числом степеней свободы является достаточно трудоемкой задачей. В связи с этим для исследования метрологических характеристик измерительных устройств такого типа были применены методы имитационного моделирования с использованием упрощенных эквивалентных электрических схем замещения (ЭЭСЗ) колебательных систем ИП.

## Дифференциальный пьезотрансформаторный датчик вязкости жидких сред

В таблицах 1, 2 приведены результаты расчета коэффициентов относительной чувствительности и эффективности МСК ИП с двумя и тремя степенями свободы.

В качестве критериев выбора оптимальных вариантов исполнения датчиков могут быть применены коэффициенты относительной чувствительности

(КОЧ) и эффективности измерительного процесса [7]. Если изменяется преимущественно только измеряемый параметр, то можно для сравнительной оценки вариантов исполнения ИП, режимов его работы и т. п. использовать условие обеспечения максимума КОЧ измерения соответствующего параметра ЭЭСЗ ИП.

Таблица 1

Значения коэффициентов относительной чувствительности ( $K_c$ ,  $K_r$ ) и эффективности ( $K_c/K_r$ ,  $K_r/K_c$ ) измерения емкости и активного сопротивления осцилляторов в системах с двумя степенями свободы

	Для амплитудных значений												
	ГВ*				В*Г				Г*Г		ГГ*		
	1НЧС		2НЧС		1НЧС		2НЧС		1НЧС		1НЧС		
	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U1	U2	
$K_r$ (г)	0,7	0,8	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,9	0,8	0,7	0,3	0,3	
$K_r$ (в)	0,2	0,3	0,3	0,7	0,7	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,8	0,7	
$K_c$	13	9	24	13	13	23	14	15	1,9	23	4,9	19,5	
$K_r/K_c$	0,2	0,4	1,3	2,2	2,6	0,8	0,4	0,2	0,3	0,5	2,4	2,2	
$K_c/K_r$	18	12	98	41	47	72	18	17	2,5	35	16	65	
	Для отношения амплитуд (дифференциальный вариант)												
	ГВ*				В*Г				Г*Г		ГГ*		
	1НЧС		2НЧС		1НЧС		2НЧС		1НЧС		2НЧС		
	U1/U2		U1/U2		U1/U2		U1/U2		U1/U2		U1/U2		
	$K_r$ (г)	0,04		0,08		0,05		0,14		0,1		0,04	
	$K_r$ (в)	0,09		0,7		0,04		0,09		0,04		0,1	
	$K_c$	23		11		12		27		22		27	
$K_r/K_c$	2,5		8,8		8,8		0,7		0,5		22		
$K_c/K_r$	616		149		236		190		222		600		

Таблица 2

Значения коэффициентов относительной чувствительности ( $K_c$ ,  $K_r$ ) и эффективности ( $K_c/K_r$ ,  $K_r/K_c$ ) измерения емкости и активного сопротивления осцилляторов в системах с тремя степенями свободы

Схема	Выход	1НЧС				2НЧС				3НЧС			
		$K_c$	$K_r$	$K_c/K_r$	$K_r/K_c$	$K_c$	$K_r$	$K_c/K_r$	$K_r/K_c$	$K_c$	$K_r$	$K_c/K_r$	$K_r/K_c$
ГВ*В	U1/U2	7,0	0,06	117	0,01	0,4	0,04	8	0,12	7,0	0,2	34	0,03
	U1/U3	4,3	0,09	49	0,02	0,5	0,04	14	0,07	1,8	0,2	8	0,12
	U2/U3	2,6	0,15	17	0,06	0,9	0,005	162	0,006	9,2	0,02	363	0,003
ГВВ*	U1/U2	2,0	0,07	27	0,04	21,1	0,72	29	0,03	0,1	0,06	1	0,9
	U1/U3	18	0,06	291	0,003	9,0	0,09	98	0,01	10,2	0,08	128	0,008
	U2/U3	15,8	0,14	115	0,009	12,7	0,82	15	0,06	10,3	0,02	625	0,002
В*ГВ	U1/U2	12,8	0,03	423	0,002					10,6	0,008	1370	0,0007
	U1/U3	19,5	0,03	567	0,002					12,7	0,009	1368	0,007
	U2/U3	7,1	0,004	1761	0,0006					2,0	0,001	1286	0,0008
ВГВ*	U1/U2	6,5	0,01	620	0,002					2,2	0,002	1250	0,0008
	U1/U3	20,4	0,03	770	0,001					12,7	0,01	1200	0,0008
	U2/U3	13,4	0,02	841	0,001					10,6	0,009	1203	0,0008

Схема	Выход	1НЧ				2НЧ				3НЧ			
		Кс	Кг	Кс/Кг	Кг/Кс	Кс	Кг	Кс/Кг	Кг/Кс	Кс	Кг	Кс/Кг	Кг/Кс
В*ВГ	U1/U2	13,2	0,02	715	0,001	36,7	0,8	48	0,02	10,8	0,008	1309	0,001
	U1/U3	15,3	0,1	159	0,006	12,2	0,05	258	0,004	12,6	0,04	281	0,003
	U2/U3	2,3	0,1	20	0,05	23,0	0,7	32	0,03	1,7	0,04	48	0,02
ВВ*Г	U1/U2	8,1	0,05	163	0,006	0,6	0,005	120	0,01	8,2	0,01	607	0,002
	U1/U3	1,7	0,04	41	0,02	2,1	0,03	80	0,01	0,2	0,06	4	0,26
	U2/U3	6,2	0,008	806	0,001	2,8	0,02	133	0,01	8,8	0,07	124	0,008
ГГВ*	U1/U2	5,0	0,02	215	0,005	8,2	0,64	12,7	0,08	1,9	0,09	20	0,05
	U1/U3	18,1	0,04	414	0,002	2,3	0,24	9,9	0,1	12,7	0,09	145	0,007
	U2/U3	12,8	0,02	623	0,002	5,9	0,9	6,5	0,15	11,0	0,004	2920	0,0003
ГВ*Г	U1/U2	7,3	0,007	1064	0,01					7,6	0,06	137	0,007
	U1/U3	1,3	0,0007	1880	0,0005					0,9	0,001	893	0,001
	U2/U3	5,8	0,008	774	0,001					8,8	0,05	161	0,006
В*ГГ	U1/U2	12,9	0,7	19	0,05	12,1	0,45	26,8	0,04				
	U1/U3	18,7	1	19	0,05	6,3	0,45	14,1	0,07				
	U2/U3	6,1	0,3	19	0,05	19,1	0,95	20,2	0,05				

Примечание. Знаком \* обозначается осциллятор, параметры которого изменяются; Г — осциллятор, к которому подключается генератор; В — вибратор.

Как следует из приведенных таблиц, наблюдается существенное отличие чувствительности датчиков, принцип работы которых основан на управлении добротностью осцилляторов и воздействием на их частотозадающие параметры. Это объясняется тем, что при изменении относительной настройки собственных частот взаимодействующих осцилляторов происходит изменение степени связанности системы, что обуславливает дополнительное перераспределение колебательной энергии между осцилляторами. В результате этого чувствительность датчиков, принцип работы которых основан на управлении реактивными параметрами осцилляторов, существенно выше, чем у датчиков, принцип работы которых основан только на управлении активным сопротивлением осцилляторов.

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что:

- МСК ИП, основанные на использовании связанных колебаний в сложных системах, характеризуются большим разнообразием вариантов конструктивного исполнения, расширенными функциональными возможностями, способны обеспечивать более высокую чувствительность и эффективность измерительного процесса по сравнению с датчиками простой конструкции;
- использование отношения выходных напряжений ПЭТ в качестве информативного сигнала датчика позволяет повысить чувствительность измерительного процесса, линеаризовать рабочую характеристику, существенно снизить

влияние на точность измерений нестабильности параметров измерительной схемы и пьезоматериала, изменение температуры окружающей среды и др.

На рисунке 3 приведен вид рабочей характеристики дифференциального пьезотрансформаторного датчика вязкости.

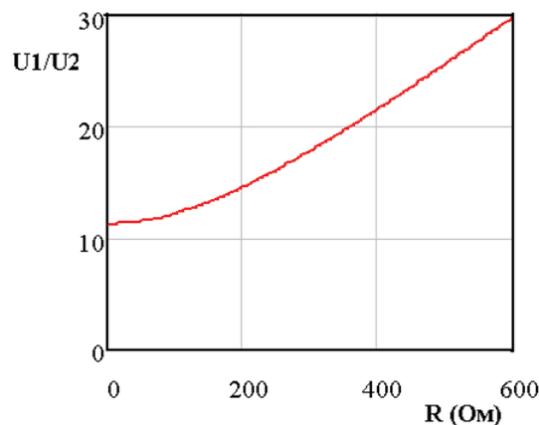


Рис. 3. Зависимость отношения выходных напряжений взаимосвязанных ПЭТ от величины активного сопротивления ЭЭСЗ вибратора

Особенностью конструкции разработанного датчика вязкости по сравнению с зарубежными аналогами, например, датчиками камертонного типа Solartron, Visconic или отечественными аналогами — Виброскан, ВВН и др., является то, что чувствительный элемент

датчика представляет собой колебательную систему, состоящую из взаимодействующих между собой вибраторов с размещенными на их поверхности пьезоэлементами. Основные преимущества разработанного дифференциального пьезотрансформаторного датчика вязкости заключаются в следующем:

- рабочая частота датчика в сотни раз выше ( $50 \div 100$  кГц), чем у датчиков камертонного типа ( $250 \div 400$  Гц), что позволяет практически исключить влияние низкочастотных производственных шумов, улучшить массогабаритные показатели

датчика, рабочий слой измеряемой среды составляет десятые и сотые доли миллиметра, что позволяет использовать его для измерения малых объемов жидкости;

- датчик обладает повышенной чувствительностью, точностью и избирательной способностью, достигаемых за счет применения дифференциального принципа формирования выходного сигнала и использования соответствующих режимов связанных колебаний в первичном измерительном преобразователе.

### Библиографический список

1. Богуш М.В. Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 т. — Ростов н/Д, 2006.
2. Земляков В.Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении: монография. — Ростов н/Д, 2009.
3. Богуш М.В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей. — М., 2014.
4. Янчич В.В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры). — Ростов н/Д, 2010.
5. Головнин В.А. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов. — М., 2013.
6. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. — М., 2006.
7. Седалищев В.Н. Пьезотрансформаторные измерительные преобразователи: монография. — Барнаул, 2015.