

Научная статья

УДК 53.08:621.317.2

DOI: 10.14258/izvasu(2024)1-07

Пьезотрансформаторный датчик вязкости с расширенным диапазоном измерения

*Виктор Николаевич Седалищев¹, Алексей Валерьевич Сеулеков²,
Роман Владимирович Краев³, Никита Николаевич Калинин⁴*

¹Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, sedalischew@mail.ru

²Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, seulekov@mail.asu.ru

³Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, kraev.roma1020@ya.ru

⁴Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия,
nik.nikita.kalinin.98@mail.ru

Original article

Piezoelectric Viscosity Sensor with Extended Measuring Range

*Viktor N. Sedalishchev¹, Alexey V. Seulekov², Roman V. Kraev³,
Nikita N. Kalinin⁴*

¹Altai State University, Barnaul, Russia, sedalischew@mail.ru

²Altai State University, Barnaul, Russia, seulekov@mail.asu.ru

³Altai State University, Barnaul, Russia, kraev.roma1020@ya.ru

⁴Altai State University, Barnaul, Russia, nik.nikita.kalinin.98@mail.ru

Приведено описание принципов построения и особенностей функционирования датчика вязкости вибрационного типа с расширенным диапазоном измерения. Измерительный преобразователь (ИП) представляет собой колебательную систему с двумя степенями свободы, состоящую из взаимодействующих вибратора и пьезоэлектрического трансформатора (ПЭТ). Вибратор является чувствительным элементом (ЧЭ), а ПЭТ используется для возбуждения механических колебаний в системе и для генерации выходного электрического сигнала датчика. Представлены результаты математического описания и имитационного моделирования двух возможных режимов работы датчика. Возбуждение сильно связанных колебаний на нормальных частотах синхронизации (НЧС) в системе может быть использовано для измерения слабовязких сред. Использование режима слабой связи в системе на парциальной частоте синхронизации (ПЧС) позволяет производить измерение вязкости в более широком диапазоне. Установка на вибраторе дополнительного ПЭТ с целью использования отношения амплитуд связанных колебаний в системе в качестве выходного сигнала датчика позволит существенно снизить влияние дестабилизирующих факторов на точность измерения вязкости.

The paper presents the principles of construction and the operational features of a vibration type viscosity sensor with an extended measuring range. A measuring transducer (MT) is a two-freedom degree oscillatory system consisting of a vibrator and a piezoelectric transformer (PET) interacting with each other. The vibrator here is a sensitive element (SE), while PET is used to excite mechanical vibrations in the system and generate an electrical output signal of the sensor. The paper provides the results of mathematical description and simulations of two possible modes of the sensor operations. Strongly coupled oscillations excited in the system at normal synchronization frequencies (NFS) can be used to measure low-viscosity media. The weak coupling mode at the partial synchronization frequency (PSF) enables the wide range viscosity measurement. Installation of an additional PET on the vibrator helps reduce the influence of destabilizing factors and improve the viscosity measurement accuracy due to the measurements of the amplitude ratio of coupled oscillations as the output signal.

Ключевые слова: датчик вязкости, пьезоэлектрический трансформатор, связанные колебания, система с двумя степенями свободы, имитационное моделирование

Keywords: viscosity sensor; piezoelectric transformer; coupled oscillations; two-freedom degree system; simulation modeling

Для цитирования: Седалищев В.Н., Сеулеков А.В., Краев Р.В., Калинин Н.Н. Пьезотрансформаторный датчик вязкости с расширенным диапазоном измерения // Известия Алтайского государственного университета. 2024. № 1 (135). С. 56–60. DOI: 10.14258/izvasu (2024)1-07.

For citation: Sedalishchev V.N., Seulekov A.V., Kraev R.V., Kalinin N.N. Piezoelectric Viscosity Sensor with Extended Measuring Range. *Izvestiya of Altai State University*. 2024. No 1 (135). P. 56–60. (In Russ.). DOI: 10.14258 / izvasu (2024)1-07.

Введение

Вязкость является одним из основных параметров контроля качества продукции в различных технологических процессах [1, 2]. В настоящее время при автоматизации производства наиболее широкое применение находят вискозиметры вибрационного типа. Принцип их работы основан на измерении механического сопротивления, оказываемого жидкой средой колеблющемуся вибратору. Измерительные преобразователи (ИП) вязкости могут иметь форму пластин, стержней, камертонов и совершать продольные, изгибные, крутильные, вращательные и другие виды колебаний с амплитудами от миллиметров до нанометров. Возбуждение в ИП механических колебаний может осуществляться электромагнитными, пьезо-

электрическими и другими способами. В настоящее время для измерения вязкости жидких сред наиболее широкое применение находят пьезорезонансные датчики [3, 4, 5]. Недостатком измерительных устройств данного типа является малый рабочий диапазон измерения, что ограничивает область их практического применения [6, 7].

С целью расширения рабочего диапазона измерений вязкости в качестве ИП предлагается использовать колебательную систему с двумя степенями свободы на базе составного ПЭТ [8, 9].

На рисунке 1 представлены два варианта построения чувствительного элемента (ЧЭ) датчика с одним и двумя ПЭТ.

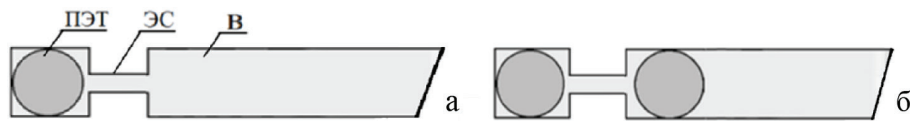


Рис. 1. Варианты конструктивного исполнения ИП с одним (а) и двумя (б) ПЭТ

Конструктивно ЧЭ датчика состоит из ПЭТ, вибратора (В) и элемента связи (ЭС) между ними. ПЭТ используется для возбуждения механических колебаний в системе и для генерации выходного электрического сигнала ИП. Вибратор имеет согласованные геометрические размеры, рассчитываемые с использованием функций Бесселя, что обеспечивает возбуждение нечетного числа стоячих волн в протяженном вибраторе и согласование их с радиальной модой колебаний ПЭТ. При реализации дифференциального варианта ИП вибратор снабжается дополнительным ПЭТ.

Механизм чувствительности датчика заключается в том, что вибратор, совершая продольные механические колебания, образует в тонком граничном слое жидкости поперечную сдвиговую волну. Глубина проникновения такой волны зависит от вязкости жидкости и частоты колебаний вибратора и может составлять от нескольких микрометров до долей сантиметра.

На рисунке 2а приведена упрощенная эквивалентная электрическая схема замещения (ЭЭСЗ) ИП в виде двух взаимосвязанных колебательных конту-

ров [10]. На рисунке 2б показано влияние вязкости жидкости на вид амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ИП.

Как следует из приведенных графиков, при измерении малой вязкости АЧХ ИП сохраняет двугорбый вид, характеризующийся наличием нормальных частот синхронизации (НЧС) синфазных (ω_1) и противофазных (ω_2) колебаний возбуждаемого пьезотрансформатора (А) и вибратора (В). При повышении измеряемой вязкости среды происходит переход частоты связанных колебаний с НЧС на парциальную частоту ПЧС (ω_3).

Для описания механизма чувствительности можно использовать следующие упрощенные аналитические зависимости, отражающие влияние на амплитуды колебаний уровня связи (γ), добротности (Q_0) и соотношения эквивалентных активных сопротивлений пьезотрансформатора (R_1) и вибратора (R_2):

$$A \approx \frac{Q_0}{1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot (\gamma \cdot Q_0)^2} \quad B \approx \frac{1}{\gamma} + \frac{Q_0}{1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot (\gamma \cdot Q_0)^2}. \quad (1)$$

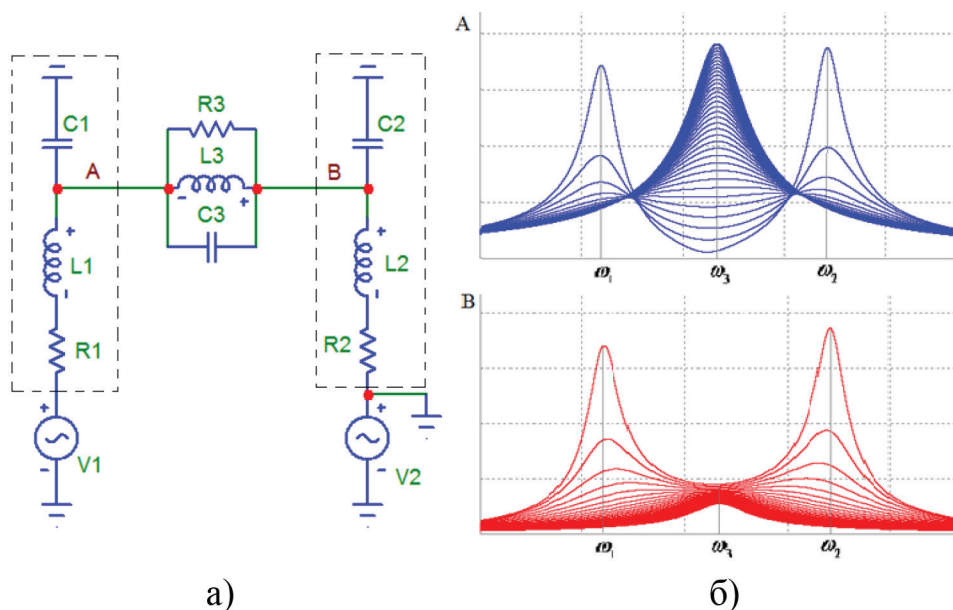


Рис. 2. ЭЭСЗ ИП с двумя степенями свободы (а) и его АЧХ (б)

В начале диапазона измерения вязкости обеспечивается режим сильной связи в системе: $\frac{R_1}{R_2}(\gamma \cdot Q) > 1$.

Повышение вязкости среды приводит к снижению добротности вибратора. При выполнении условия

$\gamma \cdot Q \approx 1$, \approx — происходит переход на парциальную

частоту колебаний (ω_3). Дальнейшее повышение вязкости среды сопровождается увеличением амплитуды колебаний возбуждаемого резонатора до значения, соответствующего амплитуде колебаний резонатора в свободном состоянии. При этом амплитуда колебаний вибратора изменяется существенно меньше.

Влияние вязкости среды на чувствительность ИП можно оценить с помощью коэффициента относительной чувствительности (КОЧ) (3):

$$K_A \approx \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot \left(\frac{1}{\gamma \cdot Q_0}\right)^2}. \quad (2)$$

На рисунке 3 приведены графики изменения амплитуды колебаний резонатора с одной степенью свободы (A_0) и амплитуд колебаний в системе с двумя степенями свободы, а также чувствительности ИП с амплитудным выходом в функции отношения эквивалентных активных сопротивлений возбуждаемого пьезотрансформатора (R_1) и вибратора (R_2).

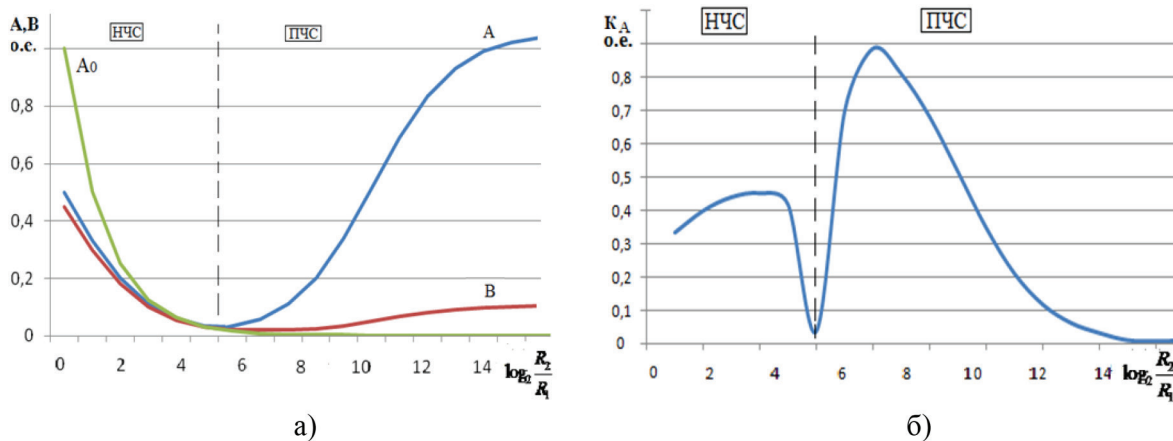


Рис. 3. Влияние вязкости среды на амплитуды связанных колебаний в системе (а) и КОЧ ИП с амплитудным выходом (б)

Из приведенных графиков следует, что ИП с двумя степенями свободы на НЧС позволяет производить измерения малых значений вязкости, а при возбуждении колебаний на ПЧС измерение больших значений вязкости в широком диапазоне с высокой чувствительностью.

С целью повышения метрологических характеристик ИП за счет уменьшения влияния дестабилизирующих факторов может быть реализован логометрический вариант построения датчика с выходом по отношению амплитуд колебаний пьезотрансформатора и вибратора (χ) (3):

$$\chi = \frac{A}{B} \approx \frac{\gamma \cdot Q_0}{1 + \left(\frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{Q_0} \right) \cdot (\gamma \cdot Q_0)^2} \quad (3)$$

Влияние вязкости среды на КОЧ ИП с логометрическим выходом можно оценить с помощью формулы (4):

$$K_\chi \approx \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot \left[\left(\frac{1}{\gamma \cdot Q_0} \right)^2 + \frac{1}{Q_0} \right]} \quad (4)$$

На рисунке 4 приведены графики, отражающие данные функциональные зависимости.

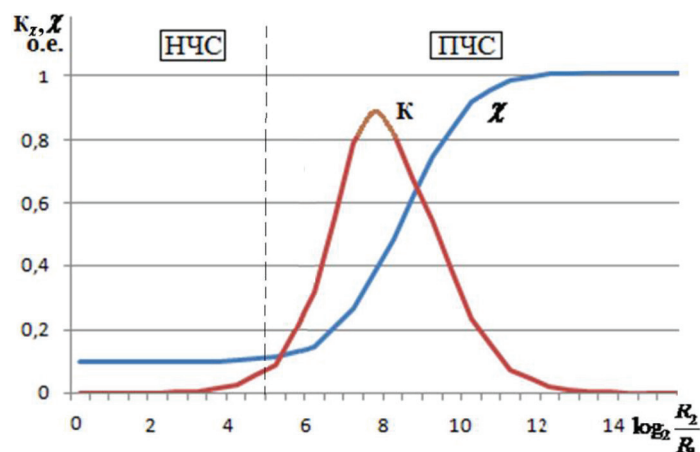


Рис. 4. Влияние вязкости среды на выходной сигнал ИП с логометрическим выходом (—) и его чувствительность (—)

Заключение

В работе представлено описание датчика вязкости на базе составного ПЭТ с двумя степенями свободы, приведены результаты имитационного моделирования режимов его работы. Установлено, что возбуждением колебаний на НЧС при сильной связи в системе обеспечивает сравнительно малый диапазон измерения вязкости и может быть рекомендован для измерения слабо вязких сред. Существенно более широкий

диапазон измерения вязкости и линейность выходной характеристики обеспечивается при возбуждении связанных колебаний в системе на ПЧС. Другим важным преимуществом данного режима работы датчика является возможность реализации логометрического способа формирования выходного сигнала датчика, позволяющая уменьшить влияние различных дестабилизирующих факторов на точность измерений вязкости жидких сред.

Библиографический список

1. Соломин Б.А., Низаметдинов А.М., Черторийский А.А., Конторович М.Л. Миниатюрный вибровискозиметрический датчик повышенной чувствительности и быстродействия // Датчики и системы. 2015. № 7. С. 35–39.
2. Heinisch M., Voglhuber-Brunnmaier T., Reichel E.K., Dufour I., Jakoby B. Reduced Order Models for Resonant Viscosity and Mass Density Sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 2014. Dec. Vol. 220. P. 76–84. DOI: 10.1016/j.sna.2014.09.006
3. Шарапов В.М., Минаев И.Г., Сотула Ж.В., Базило К.В., Куницкая Л.Г. Пьезокерамические трансформаторы и датчики / под ред. Шарапова В.М. Черкасы: Вертикаль, 2010. 278 с.
4. Hadidi S., Hassanzadeh A. A Novel Self-Powered, High-Sensitivity Piezoelectric Vibration Sensor Based on Piezoelectric Combo Effect // IEEE Sensors Journal. 2023. Nov. Vol. 23. No 21. P. 25797–25803. DOI: 10.1109/jsen.2023.3317445
5. Lee C.K., Hsu Y.H., Hsiao W.H., and Wu Jeremy W.J. Electrical and Mechanical Field Interactions of Piezoelectric Systems: Foundation of Smart Structures-based Piezoelectric Sensors and Actuators, and Free-fall Sensors // Smart Materials and Structures. 2004. Aug. Vol. 13. No 5. P. 1090–1109. DOI: 10.1088/0964-1726/13/5/015
6. Низаметдинов А.М. Измерение добротности и собственной частоты колебательной системы вибровискози-

метрического датчика // Датчики и системы. 2016. № 10. С. 15–20.

7. Spletzer M., Raman A., Wu A.Q., Xu X., Reifenberger Ron. Ultrasensitive Mass Sensing Using Mode Localization in Coupled Microcantilevers // *Applied Physics Letters*. 2006. June. Vol. 88. No 25. DOI: 10.1063/1.2216889

8. Седалищев В.Н., Сергеева Я.С. Имитационное моделирование режимов работы нелинейных измерительных преобразователей на взаимосвязанных пьезорезонаторах // Высокопроизводительные вычислительные систе-

мы и технологии. 2020. Июнь. Т. 4. № 1. С. 206–210. DOI: 10.1088/1742-6596/1615/1/012030

9. Седалищев В.Н., Сергеева Я.С., Страхатов Д.О. Применение имитационного моделирования для исследования составного пьезотрансформаторного измерительного преобразователя с дифференциальным выходом // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2021. Июнь. Т. 5 № 1. С. 264–268. DOI: 10.1088/1742-6596/2142/1/012018

10. Седалищев В.Н. Пьезотрансформаторные измерительные преобразователи. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2015. 167 с.

References

1. Solomin B.A., Nizametdinov A.M., Chertorijskij A.A., Kontorovich M.L. Miniature Vibro-viscometric Sensor of Increased Sensitivity and Speed. *Sensors and Systems*. 2015. No 7. P. 35–39. (In Russ.)

2. Heinisch M., Voglhuber-Brunnmaier T., Reichel E.K., Dufour I., Jakoby B. Reduced Order Models for Resonant Viscosity and Mass Density Sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014. Dec. Vol. 220. P. 76–84. DOI: 10.1016/j.sna.2014.09.006.

3. Sharapov V.M., Minaev I.G., Sotula Zh.V., Bazilo K.V., Kunitskaya L.G. *Piezoelectric Transformers and Sensors*. Cherkasy: Vertical, 2010. 278. p. (In Russ.)

4. Hadidi S., Hassanzadeh A. A Novel Self-Powered, High-Sensitivity Piezoelectric Vibration Sensor Based on Piezoelectric Combo Effect. *IEEE Sensors Journal*. 2023. Nov. Vol. 23. No 21. P. 25797–25803. DOI: 10.1109/jsen.2023.3317445

5. Lee C.K., Hsu Y.H., Hsiao W.H., Wu Jeremy W.J. Electrical and Mechanical Field Interactions of Piezoelectric Systems: Foundation of Smart Structures-based Piezoelectric Sensors and Actuators, and Free-fall Sensors. *Smart Materials and Structures*. 2004. Aug. Vol. 13. No 5. P. 1090–1109. DOI: 10.1088/0964-1726/13/5/015

6. Nizametdinov A.M. Measurement of Q-factor and Eigen Frequency of Oscillatory System of Viscosity Sensor. *Sensors and Systems*. 2016. No 10. P. 15–20. (In Russ.)

7. Spletzer M., Raman A., Wu A.Q., Xu X., Reifenberger Ron. Ultrasensitive Mass Sensing Using Mode Localization in Coupled Microcantilevers. *Applied Physics Letters*. 2006. June. Vol. 88. No 25. DOI: 10.1063/1.2216889

8. Sedalishchev V.N., Sergeeva Ia.S. Simulated Modeling of Operating Modes of Nonlinear Measuring Transmitters on Interconnected Piezoresonator. *High-Performance Computing Systems and Technologies*. 2020. June. Vol. 4. No 1. P. 206–210. DOI: 10.1088/1742-6596/1615/1/012030 (In Russ.)

9. Sedalishchev V.N., Sergeeva Ia.S., Strahatov D.O. Application of Simulation to Study Composite Piezotransformer Measuring Transducer with Differential Output. *High-Performance Computing Systems and Technologies*. 2021. June. Vol. 5. No 1. P. 264–268. DOI: 10.1088/1742-6596/2142/1/012018 (In Russ.)

10. Sedalishchev V.N. *Piezotransformer Measuring Transducers*. Barnaul: Altai State University, 2015. 167 p. (In Russ.)

Информация об авторах

В.Н. Седалищев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и электроники, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

А.В. Сеулеков, преподаватель кафедры вычислительной техники и электроники, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

Р.В. Краев, аспирант кафедры радиофизики и теоретической физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

Н.Н. Калинин, аспирант кафедры вычислительной техники и электроники, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия.

Information about the authors

V.N. Sedalishchev, Doctor of Sciences in Technology, Professor, Professor of the Department of Computing Techniques and Electronics, Altai State University, Barnaul, Russia;

A.V. Seulekov, Lecturer, Department of Computing Techniques and Electronics, Altai State University, Barnaul, Russia;

R.V. Kraev, Postgraduate Student of the Department of Radio Physics and Theoretical Physics, Altai State University, Barnaul, Russia;

N.N. Kalinin, Postgraduate Student of Department of Computing Techniques and Electronics, Altai State University, Barnaul, Russia.