

Особенности построения измерительных преобразователей с логометрическим выходом на основе взаимосвязанных пьезорезонаторов

В.Н. Седалищев¹, Я.С. Сергеева¹, Д.О. Страхатов², С.П. Пронин²

¹Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

²Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (Барнаул, Россия)

Specifics of Construction of Measuring Transducers with Logometric Output Based on Interconnected Piezoresonators

V.N. Sedalishchev¹, Ya. S. Sergeeva¹, D.O. Strahatov², S.P. Pronin²

¹Altai State University (Barnaul, Russia)

²Polzunov Altai State Technical University (Barnaul, Russia)

Приведены результаты имитационного моделирования измерительных устройств, основанных на использовании связанных колебаний в системах с двумя степенями свободы. Рассмотрены способы управления параметрами колебательной системы преобразователя на основе взаимосвязанных пьезорезонаторов. Произведена сравнительная оценка метрологических характеристик возможных вариантов построения пьезорезонансных датчиков с логометрическим (дифференциальным) выходом.

Показано, что при воздействии на добротность колебательной системы первичного преобразователя более высокую чувствительность измерительного процесса обеспечивает управление активным сопротивлением схемы замещения элемента связи между резонаторами. В качестве выходного сигнала датчика в данном случае предлагается использовать отношение амплитуд колебаний одного из взаимосвязанных резонаторов, измеренных на частотах синфазных и противофазных колебаний в системе. При воздействии на частотоподающие параметры преобразователя для формирования выходного сигнала рекомендуется использовать отношение амплитуд колебаний двух взаимосвязанных пьезорезонаторов, измеренных на одной из нормальных частот синхронизированных колебаний в системе.

Достоинствами измерительных устройств данного типа являются высокая чувствительность, простота конструкции, низкая стоимость, технологичность изготовления, применимость для работы в тяжелых условиях.

Ключевые слова: пьезорезонатор, колебательная система с двумя степенями свободы, имитационное моделирование.

The paper presents the results of simulation modeling of measuring devices. The simulation modeling is based on the use of coupled oscillations in systems with two degrees of freedom. Methods of controlling the parameters of the oscillatory system of the converter based on interconnected piezoresonators are considered. A comparative assessment of the metrological characteristics of possible variants of piezoresonance sensors with logometric (differential) output is conducted.

It is shown that when the Q-factor of the oscillatory system of the primary converter is affected, a higher sensitivity of the measuring process is provided by the control of the active resistance of the coupling element replacement circuit between the resonators. In this case, it is proposed to use the ratio of the oscillation amplitudes of one of the interconnected resonators measured at the frequencies of common-mode and antiphase oscillations in the system as the output signal of the sensor. When the frequency-setting parameters of the converter are affected, it is recommended to use the ratio of the oscillation amplitudes of two interconnected piezoresonators measured at one of the normal frequencies of synchronized oscillations in the system to generate the output signal.

There are several advantages of measuring devices of this type, such as high sensitivity, simplicity of design, low cost, manufacturability, and operational applicability for harsh conditions.

Key words: piezoresonator, oscillatory system with two degrees of freedom, simulation modeling.

Пьезорезонансные датчики являются широко распространенными, конструктивно простыми, технологичными, применимыми для тяжелых условий эксплуатации измерительными устройствами [1, 2, 3, 4]. На основе пьезокварца, обладающего высокой стабильностью свойств, создают датчики в основном с частотным выходом. Пьезокерамические материалы обладают большим пьезомодулем, в связи с этим на их основе создают пьезотрансформаторные датчики (ПТД) с амплитудным выходом [5, 6].

Достоинствами ПТД являются простота конструкции, технологичность изготовления, низкая стоимость, надежность в работе, применимость для работы в тяжелых условиях [7]. Недостатком ПТД с амплитудным выходом является низкая точность измерения, обусловленная нестабильностью свойств пьезокерамических материалов. Для повышения метрологических характеристик датчиков применяют дифференциальный (логотметрический) способ формирования выходного сигнала, основанный на использовании в конструкции измерительных преобразователей (ИП) двух идентичных пьезоэлектрических трансформаторов (ПЭТ). При этом измеряемая физическая величина воздействует на один ПЭТ, а второй ПЭТ используется для сравнения. В связи с этим возникает необходимость в подборе пар пьезоэлементов с близкими характеристиками. Неидентичность

изменения свойств пьезокерамических материалов во времени под воздействием различных дестабилизирующих факторов существенно снижает метрологические характеристики ПТД.

С целью повышения точности и чувствительности пьезорезонансных измерительных устройств, расширения их функциональных возможностей было разработано новое поколение ИП, основанных на использовании связанных колебаний в системах с сосредоточенными и распределенными параметрами [8, 9, 10]. Конструкции ИП такого типа могут включать в себя пьезорезонаторы (ПР), дополнительные вибраторы, элементы связи (ЭС) между ними.

В настоящей работе представлены результаты исследования связанных колебаний в ИП с двумя степенями свободы. Точное аналитическое описание динамических процессов в таких системах является достаточно сложной задачей. Формулы, описывающие рабочие характеристики ИП, имеют громоздкий вид, ненаглядны, что затрудняет анализ режимов их работы. В связи с этим было выполнено имитационное моделирование ИП, состоящего из двух взаимодействующих между собой пьезорезонаторов (рис. 1а). Эквивалентная электрическая схема замещения (ЭЭСЗ) ИП представлена в виде двух взаимосвязанных контуров (рис. 1б).

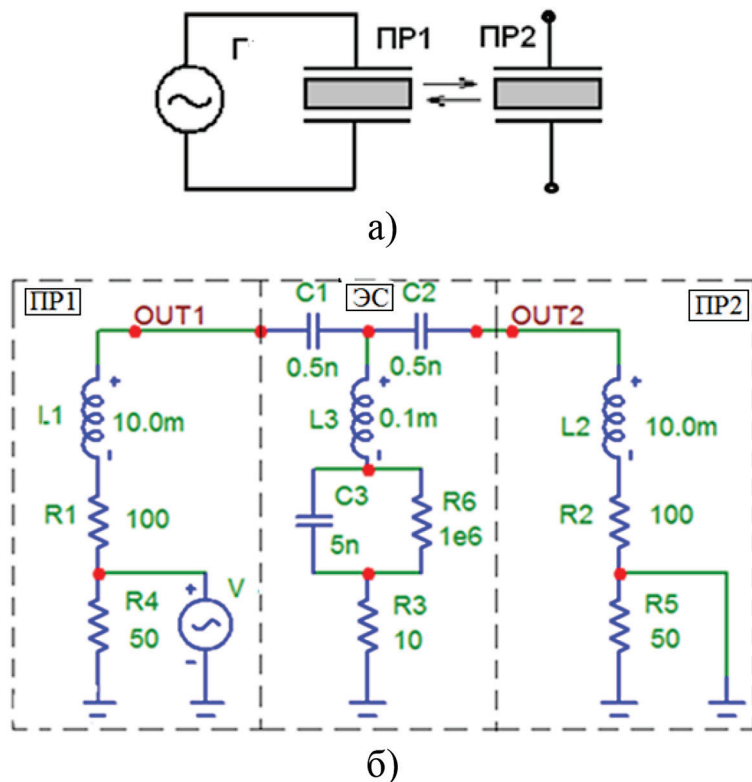


Рис. 1. Структурная (а) и эквивалентная электрическая схема замещения (б) ИП на базе взаимосвязанных пьезорезонаторов

Возбуждение колебаний в системе осуществляется от генератора (Г), подключенного к одному из ПР. Как известно из теории колебаний, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) сильно связанной колебательной системы с двумя степенями свободы имеет двугорбый вид, что отражает наличие нормальных частот синхронизации (НЧС) синфазных и противофазных колебаний в системе. Воздействие измеря-

емыми физическими величинами на определенные параметры колебательной системы ИП обуславливает соответствующие изменения амплитуд и частот связанных колебаний в системе.

На рисунке 2 представлены результаты расчетов, отражающие особенности изменения амплитуд и частот связанных колебаний резонаторов при изменении параметров ЭЭСЗ ИП.

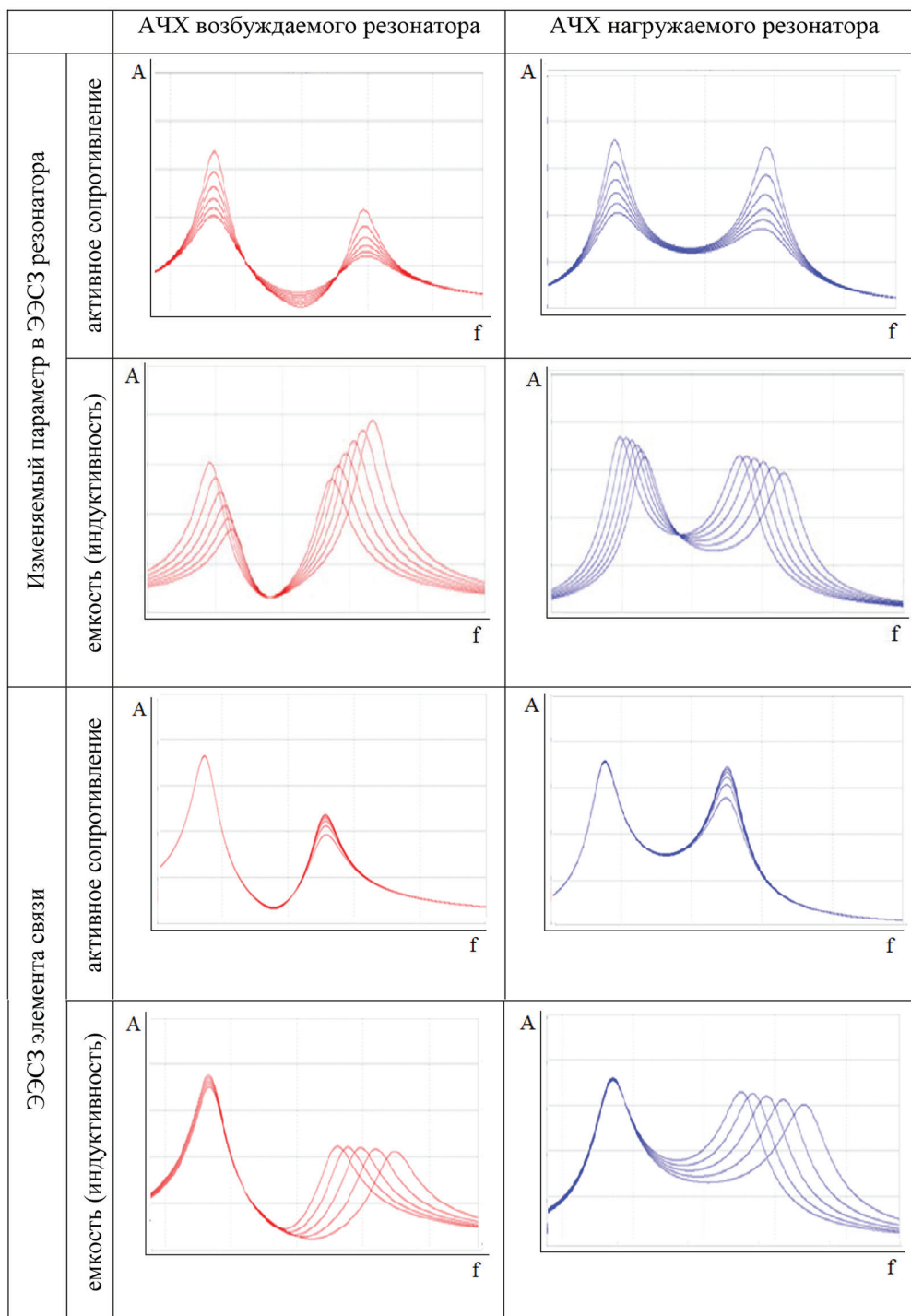


Рис. 2. Характер изменений амплитуд и частот синхронизации связанных колебаний резонаторов при управлении параметрами схемы замещения ИП

Анализ полученных графиков позволил сформулировать следующие особенности реакции колебательной системы ИП на внешние воздействия:

— управление добротностью резонаторов приводит к изменению амплитуд связанных колебаний в системе на обеих нормальных частотах синхронизации (НЧС), а при воздействии на активное сопротивление в элементе связи изменяются амплитуды колебаний преимущественно только на одной из НЧС;

— при управлении частотоподающими параметрами резонаторов изменяются амплитуды и частоты синфазных и противофазных колебаний, а при воздействии на аналогичные параметры в элементе связи изменяется НЧС противофазных колебаний.

Для сравнительной оценки возможных вариантов формирования выходного сигнала ИП такого типа предлагается использовать обобщенную АЧХ сильно связанной колебательной системы с двумя степенями свободы (рис. 3).

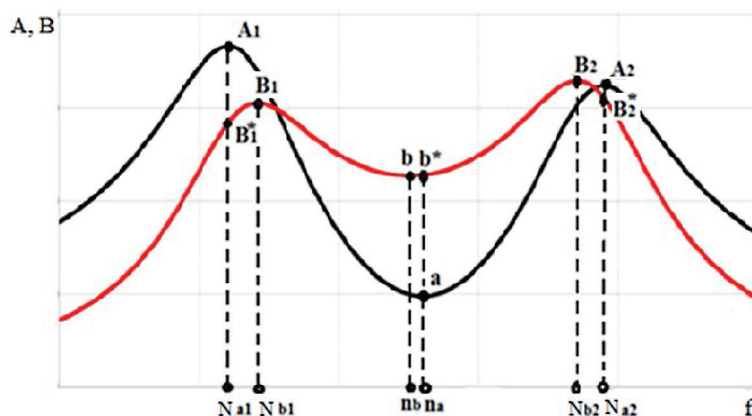


Рис. 3. Характерные точки АЧХ сильно связанной колебательной системы ИП с двумя степенями свободы (A_1, A_2, B_1, B_2 — амплитуды колебаний на НЧС; a, b — амплитуды колебаний на парциальных частотах; N_1, N_2 — НЧС колебаний; n_a, n_b — парциальные частоты колебаний в системе)

Практический интерес при создании датчиков с логометрическим выходом представляют следующие соотношения параметров обобщенной АЧХ ИП:

- $x_1 = \frac{B_1}{A_1}; x_2 = \frac{B_2}{A_2}$ — отношения амплитуд колебаний взаимосвязанных резонаторов, измеренные на одной из НЧС;

измеренные на одной из НЧС;

- $\varkappa_1 = \frac{A_2}{A_1}; \varkappa_2 = \frac{B_2}{B_1}$ — отношения амплитуд колебаний одного из резонаторов, измеренные на НЧС синфазных и противофазных колебаний в системе;

измеренные на НЧС синфазных и противофазных колебаний в системе;

- $\psi_1 = \frac{N_{a2}}{N_{a1}}; \psi_2 = \frac{N_{b2}}{N_{b1}}$ — отношения НЧС связанных колебаний в системе.

На рисунке 4 представлены графики, полученные по результатам имитационного моделирования, отражающие влияние изменяемых параметров ЭЭСЗ ИП на соотношения амплитуд и частот связанных колебаний в системе.

Как следует из приведенных графиков, более высокая крутизна и линейность выходной характеристи-

ки ИП может быть достигнута при изменении активного сопротивления в элементе связи и при воздействии на частотоподающие параметры одного из взаимосвязанных резонаторов.

Полученные результаты имитационного моделирования позволили выработать определенные рекомендации по разработке вариантов конструктивного исполнения чувствительных элементов и способов формирования выходных сигналов датчиков на основе взаимосвязанных резонаторов, предназначенных для решения конкретных практических задач.

В частности, при разработке датчиков, принцип работы которых основан на управлении добротностью колебательной системы ИП, с целью повышения чувствительности рекомендуется воздействовать измеряемой физической величиной на параметры элемента связи между резонаторами. Для датчиков, механизм чувствительности которых основан на управлении частотоподающими параметрами ИП, в качестве чувствительного элемента предлагается использовать один из взаимосвязанных резонаторов.

При создании ИП с логометрическим выходом необходимо учитывать следующие особенности:

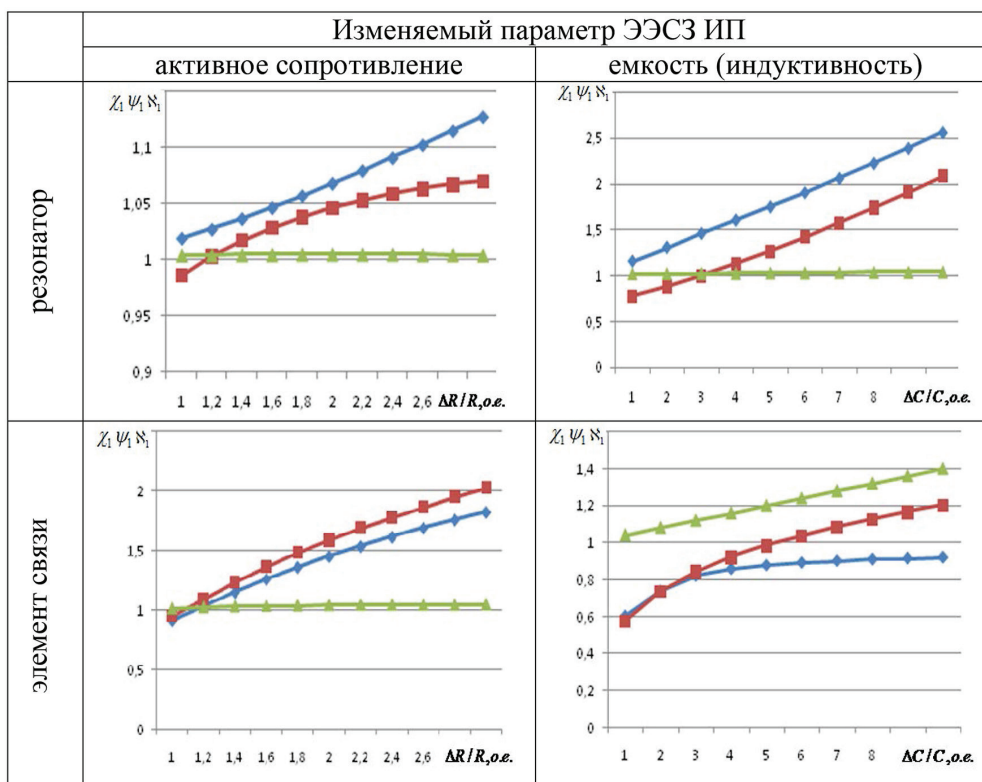


Рис. 4. Графики изменения отношений амплитуд и частот связанных колебаний (χ_1 ; ψ_1 ; N_1) в функции относительных изменений параметров ЭЭСЗ ИП ($\Delta R/R$; $\Delta C/C$)

- при управлении добротностью элемента связи для формирования выходного сигнала датчика рекомендуется использовать отношение амплитуд колебаний одного из взаимосвязанных резонаторов, измеренных на частотах синфазных и противофазных колебаний в системе;
- при воздействии на частотозадающие параметры ИП в качестве выходного сигнала датчика рекомендуется использовать отношение амплитуд колебаний взаимосвязанных резонаторов, измеренных на одной из НЧС.

Существенное отличие двух подходов к созданию ИП на базе взаимосвязанных резонаторов основано на применении известного из физики принципа о равномерном распределении энергии по степеням свободы в сложных системах. В данном случае в качестве таких степеней свободы рассматриваются не-

посредственно сами резонаторы, а также режимы синхронизации связанных колебаний между ними. Использование в качестве выходного сигнала ИП отношения амплитуд колебаний одного из взаимосвязанных резонаторов, измеренных на двух НЧС, позволяет избавиться при создании датчиков с логометрическим выходом от необходимости в подборе пар пьезоэлементов с идентичными характеристиками.

На рисунке 5 представлена структурная схема одного из вариантов построения ИП с логометрическим выходом на базе составного пьезоэлектрического трансформатора (ПЭТ). Возбуждение колебаний в системе осуществляется от генератора электрических сигналов (Г). В зависимости от решаемой задачи чувствительным элементом датчика может служить вибратор (В) и (или) элемент связи (ЭС).

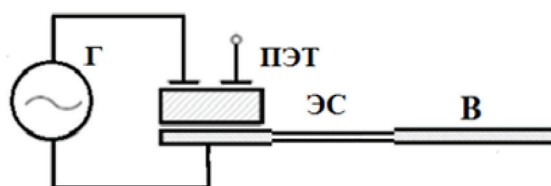


Рис. 5. Структурная схема ИП на базе составного ПЭТ

Датчики на базе составных ПЭТ имеют простую конструкцию, низкую стоимость, технологичны при изготовлении, надежны в эксплуатации, применимы для работы в тяжелых условиях.

Измерительные устройства такого типа требуют необходимости использования современной микропроцессорной техники, разработки соответствующего программного обеспечения.

Библиографический список

1. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. М., 2007.
2. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации // Пьезоэлектрическое приборостроение : сб. в 3 томах. Т. 3. Ростов /нД, 2006.
3. Spletzer M., Raman A., Wu A. Q., Xu X. Ultrasensitive mass sensing using mode localization in coupled microcantilevers // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 88, 254102. DOI: 10.1063/1.2216889.
4. Zaitsev B.D., Semyonov A.P., Teplykh A.A., Borodina I.A. The sensor for measuring the micro-displacements based on the piezoelectric resonator with lateral electric field // *Ultrasonics*. 2019. Vol. 99, 105973.
5. Пьезоэлектрическая керамика: принципы и применение / пер. с. англ. С.Н. Жукова. Минск, 2003.
6. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. М., 2006.
7. Седалищев В.Н. Пьезотрансформаторные измерительные преобразователи : монография. Барнаул, 2015.
8. Партс Я.А. Многочастотные пьезорезонансные датчики: принцип действия, способы построения, решаемые задачи // *Нелинейный мир*. 2009. № 5. Т.7.
9. Евдокимов Ю.К., Партс Я.А. Квазираспределенные пьезорезонансные датчики в промышленных системах измерения температуры // *Мир измерений*. 2010. № 3 (109).
10. Sedalichev 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.*