

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПЬЕЗОТРАНСФОРМАТОРНОГО ДАТЧИКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ СРЕД

В. Н. Седалищев, М. Ю. Ларионов, Д. О. Страхатов, А. Н. Исаков
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»,
г. Барнаул

В статье представлены результаты имитационного моделирования частотных характеристик дифференциального пьезотрансформаторного датчика физико-механических характеристик жидких сред, основанного на использовании связанных колебаний в теле монолитного пьезорезонатора. Показано, что рациональный выбор рабочей частоты устройства позволяет повысить эффективность измерения вязкости, плотности и упругости жидкости. Первичные измерительные преобразователи такой конструкции обеспечивают повышение точности измерения.

Ключевые слова: измерение вязкости, плотности и упругости жидких сред, дифференциальный пьезотрансформаторный датчик, эквивалентная электрическая схема замещения датчика, связанные колебания монолитных пьезорезонаторов.

В настоящее время практически не существует универсальных приборов промышленного изготовления, позволяющих измерять несколько физико-механических характеристик жидких сред, таких как вязкость, упругость, плотность, силы поверхностного натяжения и др. Измерительные устройства такого типа, могут найти применение для определения характеристик смазочных средств в машиностроении и на транспорте, для контроля качества продуктов питания в пищевой промышленности (молока, масла, паст и др.), для исследования вязкоупругих характеристик биологических жидких сред (крови, ее плазмы и т.п.).

С помощью существующих вискозиметров практически трудно, а для некоторых типов даже невозможно совместить измерение вязкости жидкости с измерением ее плотности и упругости. Для этой цели наиболее пригодны датчики вибрационного типа, например, пьезорезонансные датчики (ПРД) [1]. В измерительных устройствах такого типа вязкость жидкости управляет добротностью колебательной системы датчика, а плотность измеряемой среды влияет на собственную частоту колебательной системы измерительного преобразователя (ИП). Для повышения точности измерений применяют дифференциальный метод, основанный на использова-

нии двух отдельных ПР. Но при этом трудно обеспечить полную идентичность характеристик используемых ПР. В связи с этим представляет интерес проведение исследований с целью разработки многофункциональных датчиков, дифференциального типа на базе монолитных ПР, применимых для измерения вязкости, плотности и упругости жидких сред.

Задача по созданию измерительных устройств такого типа усложняется тем, что упругость и сдвиговая вязкость жидкости малы по величине, а при высоких частотах колебаний ПР сдвиговые волны распространяются на малые расстояния, что существенно затрудняет их измерение. Поэтому при разработке датчиков упругости, плотности и сдвиговой вязкости необходимо изыскивать способы повышения избирательной чувствительности по отношению к одним параметрам и снижению чувствительности к другим параметрам.

С целью расширения функциональных возможностей измерительных устройств вибрационного типа, повышения чувствительности к измерению физико-механических характеристик жидких сред, предлагается в качестве чувствительного элемента датчика использовать ПР с системой дополнительных обкладок на его поверхности в теле которого будут возбуждаться взаимосвязанные коле-

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПЬЕЗОТРАНСФОРМАТОРНОГО ДАТЧИКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ СРЕД

бания [6, 8, 9]. Датчики такого типа являются нелинейными измерительными устройствами, они обладают большими возможностями измерения различных параметров, конструктивных решений и режимов работы [3-9].

Эквивалентная электрическая схема замещения (ЭЭСЗ) измерительного преобразователя (ИП) и объекта измерения (ОИ) в общем случае могут быть представлены в виде колебательных контуров. При этом аналогом упругости жидкости будет являться электрическая емкость, аналогом вязкости – активное сопротивление, а аналогом плотности – индуктивность ЭЭСЗ ОИ. Изменяя соответствующим образом рабочую частоту и режим работы ИП можно осуществлять выборочное измерение различных физико-механических характеристик жидких сред [3-5]. При этом с целью обеспечения большей селективности измерительного процесса необходимо обеспечить повышенную чувствительность к одним физическим величинам и снизить чувствительность к влиянию других факторов.

При проведении имитационного моделирования для количественной оценки чувствительности и эффективности измерительного процесса, реализующего нелинейную функцию вида $y = F(x; t)$, были применены коэффициент относительной чувствительности (КОЧ) и коэффициент эффективности (Кэфф) [5].

$$КОЧ(x) = \frac{\partial y / \partial x}{y/x} = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{y}{x} = \left(\frac{S_H}{S_L} \right)_t \quad (1)$$

$$КОЧ(t) = \frac{\partial y / \partial t}{y/t} = \frac{\partial y}{\partial t} \cdot \frac{y}{t} = \left(\frac{S_H}{S_L} \right)_x \quad (2)$$

$$Кэфф(x/t) \approx \frac{\left(\frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{y}{x} \right)_t}{\left(\frac{\partial y}{\partial t} \cdot \frac{y}{t} \right)_x} \approx \frac{\left(\frac{S_H}{S_L} \right)_t}{\left(\frac{S_H}{S_L} \right)_x} = \frac{КОЧ(x)}{КОЧ(t)} \quad (3)$$

В соответствии с приведенными формулами $Кэфф(x/t)$ отражает соотношение чувствительности ИП к измеряемой физической величине и дестабилизирующему фактору.

Получение точных аналитических зависимостей чувствительности и эффективности измерительного устройства от частоты является достаточно трудоемкой задачей. Для оценки общих подходов к разработке и совершенствованию измерительных устройств такого типа достаточно использовать методы

имитационного компьютерного моделирования.

ПР с согласованными геометрическими размерами, характеризующиеся моночастотностью, в упрощенном виде могут быть представлены в виде колебательных контуров с одной степенью свободы. Пьезоэлементы с несогласованными геометрическими размерами представляют собой достаточно сложные колебательные системы, в которых реализуются разнообразные типы взаимосвязанных колебаний. Поэтому, даже конструктивно простые ПР могут рассматриваться как сложные колебательные системы с двумя и более степенями свободы, а датчики на их основе могут быть отнесены к классу МСК ПРД, то есть к датчикам, основанным на модуляции связанных колебаний ПР [3-9].

Наиболее конструктивно простыми МСК ПРД такого типа являются дифференциальные пьезотрансформаторные датчики (ДПТ) на базе монокристаллических пьезорезонаторов (Рисунок 1а) [5].

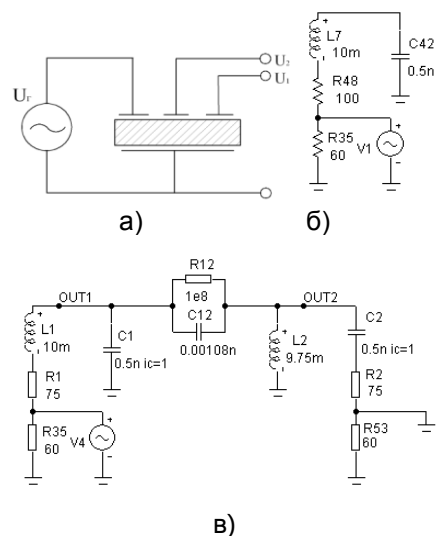


Рисунок 1 – Устройство МСК ПРД на базе монокристаллического ПР (а), варианты представления ЭЭСЗ в виде колебательной системы с одной (б) и двумя (в) степенями свободы

Измерительные преобразователи такого типа можно рассматривать с позиций колебательных систем с одной или двумя степенями свободы. В первом случае ЭЭСЗ такого ИП можно представить в виде одиночного колебательного контура (рисунок 1б). При этом эквивалентная емкость представляет в ЭЭСЗ центральную область пьезорезонатора, а индуктивность – периферийную. Второй вари-

ант ЭЭСЗ ИП представляет собой колебательную систему с двумя степенями свободы. При этом каждая степень свободы отражает реализацию в системе определенного типа колебаний. Например, в дисковом ПР взаимодействующими степенями свободы могут являться радиальная и толщинная мода колебаний пьезоэлемента. Создавая приращения соответствующих параметров ЭЭСЗ такого ПРД можно выполнить имитационное моделирование различных механизма чувствительности датчика и произвести оценку частотной зависимости его метрологических характеристик. Это задача является важной в связи с тем, что на метрологические характеристики датчиков вязкости жидких сред большое влияние оказывает частота колебаний чувствительного элемента. При повышении рабочей частоты датчика возрастает влияние упругости исследуемой среды на результат измерения вязкости. Поэтому при разработке многофункциональных ПРД физико-механических характеристик жидких сред требуется выполнить частотный анализ их метрологических характеристик. Это позволит произвести определить условия, обеспечивающие наибольшую эффективность измерения вязкости, упругости и плотности жидких сред по отдельности.

С целью оптимизации режимов работы ИП такого типа было проведено с использованием имитационного моделирования исследование влияния рабочей частоты датчика на его метрологические характеристики.

На рисунках 2 – 6 представлены частотные зависимости для амплитуд (АЧХ), КОЧ и Кэфф для однорезонаторных МСК ИП.

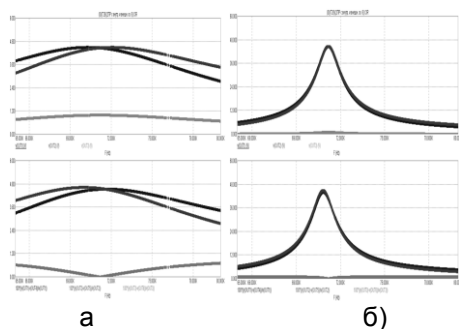


Рисунок 2 – Частотные зависимости для амплитуд колебаний, измеренных на элементах схемы замещения и соответствующие им КОЧ для низкодобротного (а) и высокодобротного (б) контуров

Из приведенных графиков следует, что амплитуды колебаний на емкости достигают максимальных значений на первой резонансной частоте, для индуктивности - на более высокой резонансной частоте, на активном сопротивлении – в промежутке между этими частотами. Это говорит о том, что максимальные значения чувствительности измерения упругости, вязкости и плотности будут обеспечиваться на разных рабочих частотах.

В реальных ДПТ-датчиках выходной сигнал может сниматься с одной или с двух обкладок одного пьезоэлемента. При выполнении имитационного моделирования это будет соответствовать измерению амплитуды колебаний на одном или двух реактивных сопротивлениях ЭЭСЗ ИП (на емкости и индуктивности).

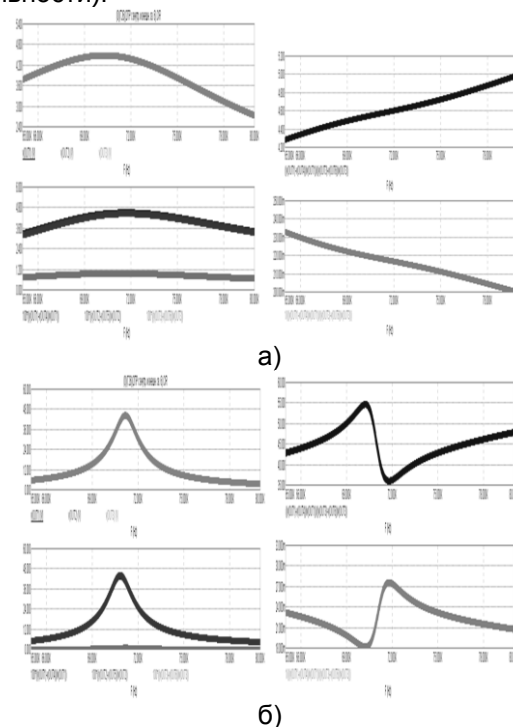


Рисунок 3 – АЧХ, частотные зависимости КОЧ(С), КОЧ(Р), Кэфф(С/Р) и Кэфф(Р/С) при измерении напряжения на емкости для низкодобротного (а) и высокодобротного (б) контуров

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПЬЕЗОТРАНСФОРМАТОРНОГО ДАТЧИКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ СРЕД

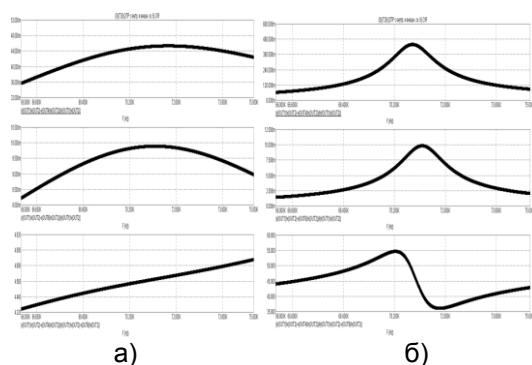


Рисунок 4 – Частотные зависимости КОЧ(С), КОЧ(Л) и Кэфф при измерении отношения напряжений на емкости и индуктивности для низкодобротного (а) и высокодобротного (б) контуров

Из приведенных графиков следует, что чувствительность и эффективность измерения реактивных параметров контура возрастают с повышением его добротности. Для низкодобротного контура эффективность измерения емкости и индуктивности приблизительно соответствует значению добротности и слабо зависит от частоты. Максимумы чувствительности и эффективности измерения реактивных параметров ЭЭСЗ ИП достигаются на разных частотах. КОЧ измерения отношений амплитуд колебаний реактивных элементов ЭЭСЗ ИП существенно меньше, чем при измерении амплитуд колебаний, но эффективность их измерения при этом может быть высокой, так как соответствует значению добротности контура.

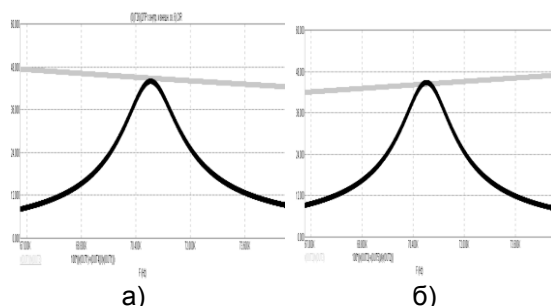


Рисунок 5 – Частотные зависимости КОЧ и добротности для емкости (а) и индуктивности (б) контура

В функции частоты добротность ИП и эффективность измерительного процесса изменяются противоположно (Рисунок 8).

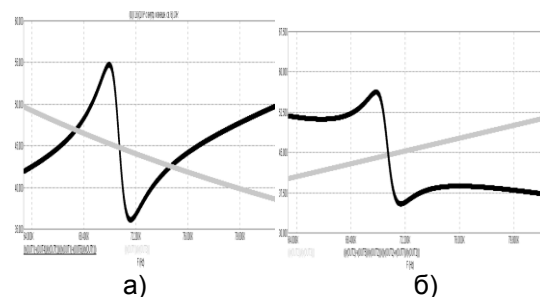


Рисунок 6 – Частотные зависимости для добротностей реактивных элементов ЭЭСЗ ИП и эффективности их измерения при дестабилизирующем изменении активного сопротивления

Как следует из приведенных графиков, с целью повышения чувствительности и эффективности измерения реактивных параметров ЭЭСЗ ИП (соответственно при измерении упругости и плотности среды) нужно использовать высокодобротные ПР. При измерении вязкости жидкости нужно, наоборот, использовать низкодобротные ИП.

Таким образом, по результатам имитационного моделирования частотных зависимостей метрологических характеристик однорезонаторных ДПТ датчиков можно выработать следующие рекомендации:

- для создания ДПТ датчиков физико-механических характеристик жидких сред нужно использовать пьезоэлементы с несогласованными геометрическими размерами;
- для измерения плотности и упругости жидких сред нужно применять высокодобротные пьезоматериалы, а при измерении вязкости нужно снижать добротность колебательной системы датчика;
- в качестве выходного сигнала ДПТ датчика вязкоупругих характеристик жидких сред рекомендуется использовать отношение (разность) выходных напряжений, снимаемых с дифференциальных обкладок ДПТ датчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малов, В.В. Пьезорезонансные датчики. – М: Энергоатом издат, 1989. – 272 с.
2. Седалищев, В.Н. Применение имитационного моделирования для сравнительного анализа вариантов построения многоэлементных пьезорезонансных датчиков / В.Н. Седалищев, М.Ю. Ларионов // Ползуновский альманах. - 2012. - № 2. - С. 37-42.

3. Седалищев, В.Н. Акусточувствительный датчик статических усилий с использованием связанных колебаний пьезорезонаторов / В.Н. Седалищев, М.Ю. Ларионов, С. П. Пронин, А. В. Новичихин, Е. М. Крючков // Ползуновский альманах. - 2012. - № 2. - С. 71-72.

4. Седалищев, В.Н. Использование связанных колебаний пьезорезонаторов для исследования физико-механических и трибологических характеристик поверхности твердых тел / В.Н. Седалищев, М.Ю. Ларионов Е. М. Крючков, А. В. Новичихин // Ползуновский альманах. - 2012. - № 2. - С. 6-10.

5. Седалищев, В.Н. Высокочувствительные пьезорезонансные датчики с использованием связанных колебаний для экстремальных условий эксплуатации / В.Н. Седалищев, О.И. Хомутов – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. -184 с.; 55 см. – Библиогр.; с. 180 – 184. – 100 экз. - ISBN 5-7568-0669-5

6. Седалищев, В.Н. Пьезорезонансный МСК датчик вязкоупругих характеристик жидких сред с микозазором / В.Н. Седалищев, М.Ю. Ларионов

С.А. Синеев, А.А. Соснова, Д.О. Страхатов// Ползуновский альманах. - 2013. - № 1. - С. 145-148

7. Седалищев, В.Н. Устройство для измерения уровня сыпучих материалов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2006. - № 6. - С. 49 – 50.

8. Седалищев, В.Н. Особенности конструирования пьезоэлектрических измерительных устройств на связанных колебаниях // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2006. - № 4. - С. 44-46.

9. Седалищев, В.Н. Использование связанных колебаний в пьезорезонансных датчиковых структурах // Измерительная техника. - 2006. - № 3. - С. 59-61.

Седалищев Виктор Николаевич – д.т.н., профессор, тел.: (3852) 260492, e-mail: sedalischew@mail.ru; Ларионов Максим Юрьевич – аспирант, тел.: (3852) 260492; Страхатов Дмитрий Олегович – студент, тел.: (3852) 260492; Исаков А.Н. – студент.