

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, ОСНОВАННЫЕ НА РЕАЛИЗАЦИИ РЕЖИМОВ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ДАТЧИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

В.Н. Седалищев

Анализируя принципы построения пьезоэлектрических измерительных устройств, можно выделить два основных направления их конструирования. При разработке пьезорезонансных датчиков (ПРД) [1] реализуют резонансные режимы работы высокодобротных пьезоэлементов, обеспечивают акустическую развязку колебательной системы с элементами конструкции датчика. Механизм чувствительности ПРД основан на модуляции в функции измеряемой физической величины параметров колебательной системы преобразователя. В ультразвуковых приборах [2], наоборот, чаще всего используют не резонансные режимы работы пьезоэлектрических излучателей и приемников акустических сигналов, демпфируют их колебания, принимают меры по согласованию импедансов преобразователя и объекта измерения. Принцип работы таких устройств основан на управлении измеряемой физической величиной условий прохождения акустическим сигналом различных сред. Согласно общей теории колебаний оба режима работы пьезоэлектрических преобразователей являются частными случаями связанных колебаний в системах с конечным числом степеней свободы. Между тем известно [3], что колебательная система обладает максимальной чувствительностью к изменению параметров при реализации режима бифуркации связанных колебаний. В связи с этим представляет интерес разработка общих принципов построения нового поколения высокоэффективных, многофункциональных пьезоэлектрических измерительных устройств основанных на использовании режимов связанных колебаний в датчиковых структурах.

При разработке и оптимизации конструкции датчиков данного типа для реализации высокочувствительных режимов работы преобразователя в окрестностях точки бифуркации связанных колебаний необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} \gamma\chi \cos \varphi \approx \zeta \\ \gamma Q \approx 1 \\ \zeta Q \approx 1 \end{cases}$$

где  $\gamma$  – коэффициент связи,  $\zeta$ , – относительная расстройка частот колебаний,  $\chi$  – относи-

тельная расстройка амплитуд колебаний,  $Q$  – добротность колебательной системы,  $\varphi$  – разность фаз связанных колебаний.

В зависимости от назначения измерительного устройства и конструктивного исполнения первого измерительного преобразователя можно выделить четыре основных способа управления параметрами связанных колебаний ПРД, основанных на управлении измеряемой физической величиной; коэффициента связи, относительной расстройки частот, отношения амплитуд или разности фаз колебаний.

К первой группе датчиков, можно отнести измерительные устройства, в которых взаимодействие резонаторов осуществляется через жидкостный, газообразный или твердотельный канал связи, являющийся одновременно и чувствительным элементом измерительного преобразователя. Поэтому управляемой характеристикой колебательной системы датчика является коэффициент акустической связи.

Второй принцип построения измерительных устройств такого типа заключается в том, что измеряемая физическая величина модулирует параметры взаимодействующих степеней свободы колебательной системы датчика, при этом изменяется их относительная расстройка частот.

При использовании измеряемой среды в качестве акустического канала связи между взаимодействующими резонаторами возможна модуляция измеряемым параметром разности фаз связанных колебаний, что также может быть положено в основу создания измерительных устройств.

Особый интерес представляет реализация способов управления отношением амплитуд связанных колебаний. Модуляцию данного параметра можно осуществить различными способами;

а) путем воздействия, на добротность колебательной системы датчика,

б) регулированием уровня возбуждения со стороны генератора,

в) используя дополнительный генератор накачки на разностной или суммарной частоте т.п.

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, ОСНОВАННЫЕ НА РЕАЛИЗАЦИИ РЕЖИМОВ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ДАТЧИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

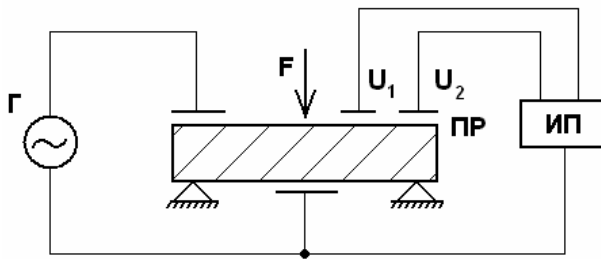


Рисунок 1

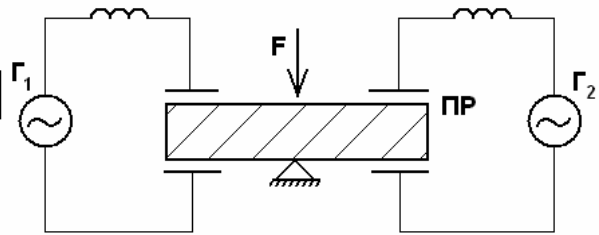


Рисунок 2

В последнем случае при совпадении частоты модуляции связанных колебаний с частотой биения колебаний в системе устанавливается режим внутреннего резонанса, который может обусловить возрастание глубины амплитудной модуляции. Если при этом используется дополнительный колебательный контур, то в такой сложной колебательной системе возможны переходные процессы с периодической сменой синхронного и асинхронного режимов связанных колебаний. Аналитическое описание динамических процессов в системах с тремя и более степенями свободы весьма затруднительно. Но в частных случаях сложные режимы можно представить композицией более простых режимов. Например, если в системе реализуется одновременно процессы, связанных синхронных и асинхронных колебаний, то можно измерять параметры, характеризующие динамику как синхронных, так и асинхронных колебаний по отдельности. Поэтому в зависимости от реализуемого метода измерения колебательная система датчика может состоять как из одного монолитного пьезоэлемента, в теле которого возбуждаются многомодовые связанные колебания, так и из нескольких акустически связанных пьезорезонаторов, в том числе и составных.

Например, на базе монолитных дисковых пьезокерамических резонаторов были разработаны дифференциальные пьезотрансформаторные преобразователи, предназначенные для измерения статических усилий [4], вязкости жидких сред.

На рис. 1 представлена конструкция первичного измерительного преобразователя, реализующего режим сильносвязанных радиально-толщинных колебаний дискового пьезорезонатора. Под действием измеряемого усилия в теле пьезоэлемента создаются механические напряжения, которые обуславливают изменение относительной расстройки парциальных частот связанных продольно-поперечных колебаний диска. В результате перераспределения колебательной энергии

между взаимодействующими степенями свободы датчика происходит соответствующее изменение значений выходных напряжений, снимаемых с центральной и периферийной обкладок пьезоэлемента.

Недостатком монолитной конструкции датчика на связанных колебаниях является малая чувствительность, обусловленная невозможностью выполнения требования обеспечения оптимальной связи между взаимодействующими степенями свободы высокодобротных пьезорезонаторов. Данную проблему можно решить путем создания специальных конструкций первичных измерительных преобразователей, состоящих, например, из акустически связанных пьезорезонаторов или электрических колебательных контуров. При этом появляются дополнительные возможности, позволяющие реализовать не только синхронный, но и асинхронный режим биения колебаний с частичным увлечением частот, а также переходные процессы входа-выхода системы в синхронизм.

Для примера на рис. 2 приведена структурная схема датчика усилий [4, 5], реализующая высокочувствительный бифуркационный режим взаимодействия между двумя электрическими колебательными контурами, связь между которыми осуществляется за счет обмена акустической энергией с помощью пьезоэлемента. Механизм чувствительности данного устройства основан на использовании зависимости диэлектрической проницаемости пьезокерамики от величины механических напряжений, создаваемых в ней измеряемым усилием. Достоинством такой конструкции преобразователя является возможность обеспечения достаточно хорошей акустической развязки колебательной системы датчика с силопередающими элементами за счет того, что собственная частота пьезоэлемента не соответствует резонансным частотам электрических колебательных контуров.

Большим разнообразием конструктивных исполнений и широкой областью их практиче-

ского применения характеризуются датчики, основанные на использовании двух акустически связанных пьезорезонаторов. К настоящему времени разработаны разнообразные конструкции первичных преобразователей такого типа, предназначенные для измерения различных физических величин; давлений [6], усилий [7-9], скорости потока [10], плотности и уровня раздела жидких сред и т.п. Достоинством таких устройств является простота конструкции, низкая стоимость, высокая чувствительность, хорошая сопрягаемость с микропроцессорной техникой.

Наиболее простую конструкцию имеют датчики статических усилий контактного типа, состоящую из двух акустически связанных пьезорезонаторов, которые возбуждаются по отдельности от собственных генераторов. Механизм чувствительности измерительных преобразователей данного типа основан на реализации функциональной зависимости площади акустического контакта между пьезорезонаторами и элементом связи от величины измеряемого усилия. Снижение динамической погрешности, обусловленной низкой стабильностью упругих деформаций, достигается закалкой и тренировкой контактирующих поверхностей под нагрузкой до образования «наклепа».

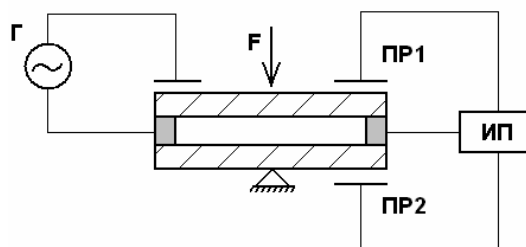


Рисунок 3

Существенно повысить точность измерения усилий с помощью ПРД на связанных колебаниях позволяет применение тензочувствительного метода, основанного на управлении упругими деформациями непосредственно самих вибраторов. Данный принцип измерения реализован, например, в датчике усилий [11], конструкция которого представлена на рис. 3. Колебательная система первичного преобразователя состоит из двух жестко соединенных по периметру дисковых пьезокерамических резонаторов. Измеряемое усилие прикладывается в центры пьезоэлементов, что позволяет достигнуть достаточно хорошей акустической развязки с элементами конструкции датчика, так как при возбуждении резонаторов на резонансной частоте ради-

С целью повышения метрологических характеристик таких датчиков был применен режим синхронизации связанных колебаний резонаторов [9]. Выходной сигнал такого преобразователя пропорционален длительности переходного процесса, возникающего в колебательной системе при ступенчатом изменении напряжения автогенератора. Положительный эффект в данном случае достигается за счет того, что время механического релаксационного процесса меньше времени переходного процесса в колебательной системе преобразователя.

В датчиках усилий [7, 8] с целью повышения чувствительности был применен элемент связи конической формы, установленный таким образом, что относительная расстройка частот резонаторов в процессе измерений изменяется в функции измеряемого усилия за счет неидентичности изменения контактной жесткости взаимодействующих пьезорезонаторов. Датчики такого типа могут быть использованы в качестве, например, сигнализаторов усилий, давлений, микроперемещений при автоматизации технологических процессов.

альной моды колебаний, в центрах дисков образуются узлы колебаний. Колебательная система датчика имеет две степени свободы, поэтому характеризуется наличием резонансных частот синфазных и противофазных колебаний пьезоэлементов. При противофазных колебаниях резонаторов возбуждаются изгибные деформации конструкции чувствительного элемента датчика. Согласование геометрических размеров преобразователя обеспечивает установление режима сильной связи радиальной моды с одним из оборотов изгибных колебаний дисков. Под действием приложенного к преобразователю измеряемого усилия возрастает жесткость резонаторов, вследствие чего уменьшается величина акустической связи, что приводит к

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, ОСНОВАННЫЕ НА РЕАЛИЗАЦИИ РЕЖИМОВ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ДАТЧИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

сближению нормальных частот связанных колебаний. Так как парциальные частоты резонаторов не равны, то между ними происходит перераспределение колебательной энергии. В результате выходное напряжение на генераторной обкладке у одного пьезоэлемента возрастает, а у другого убывает. Использование в качестве выходного сигнала датчика величины пропорциональной отношению электрических напряжений, снимаемых с генераторных обкладок пьезоэлементов, позволяет избавиться от влияния дестабилизирующих факторов. Для данного типа датчиков разработаны конкретные рекомендации по регулированию силовчувствительности, повышению линейности нагрузочной характеристики датчика, в основе которых лежит корректировка парциальных частот резонаторов и создание условий неидентичного изменения их под действием измеряемого усилия.

К достоинствам датчиков, основанных на использовании сильносвязанных резонаторов, можно отнести простоту конструкции, низкую стоимость, возможность применения сравнительно дешевой и широко распространенной пьезокерамики, а к недостаткам –

низкую перегрузочную способность, сложность конструкции силопередающего узла.

Для измерения давлений были разработаны датчики с газообразными, жидкостными и твердотельными элементами связи. Особенностью преобразователей с газообразным элементом акустической связи является необходимость применения высокочастотных пьезорезонаторов, в то время как для датчиков с жидкостным или твердотельным элементом связи могут быть использованы низкочастотные, например, пьезокерамические материалы. Достоинством измерительных устройств, в которых элементом акустической связи между взаимодействующими резонаторами служит измеряемая среда, является то, что датчик не содержит упругого чувствительного элемента, поэтому может быть использован для измерения малых давлений.

Принцип работы ПРД давления иммерсионного типа [6] основан на реализации функциональной зависимости коэффициента акустической связи между взаимодействующими резонаторами от величины измеряемого давления.

Аналогичную конструкцию чувствительного элемента имеют датчики контроля уровня раздела жидких сред, плотности растворов.

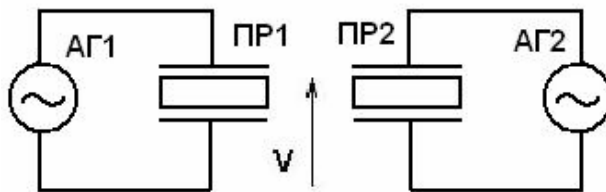


Рисунок 4

Целесообразность реализации режимов связанных колебаний в приборах ультразвукового контроля можно показать на примере устройства для измерения скорости потока жидких и газообразных сред [10], представленного на рис. 4. В отличие от известных ультразвуковых приборов измерения скорости потока, основанных на использовании принципа двух «синхроколец», в данном устройстве разностный сигнал формируется непосредственно на физическом уровне в результате перераспределения колебательной энергии между пьезорезонаторами. Это позволяет улучшить метрологические характеристики устройства и существенно упростить его измерительную схему.

В отличие от режима слабосвязанных колебаний, позволяющего повысить эффективность процесса измерительного преобразования, режим сильносвязанных колебаний может быть использован как способ передачи

измерительной информации по каналу акустической связи между взаимодействующими резонаторами. Достоинством датчиков такого типа является возможность эксплуатации в экстремальных условиях, в пожаро- и взрывоопасных средах, при высоких и сверхнизких температурах, наличии сильных механических воздействий и т. п.

На рис. 5 представлено серийно выпускаемое многоточечное устройство контроля уровня сыпучих материалов, предназначенное для применения в системах золоудаления на тепловых электростанциях. Особенностью конструкции датчика, используемого в данном устройстве, является то, что первичный измерительный преобразователь состоит из двух отдельных, акустически связанных между собой резонаторов. Это позволяет удалить пьезоэлектрический преобразователь, с помощью которого осуществляется

возбуждение механических колебаний резонаторов и генерация выходного электрического сигнала, на необходимое расстояние от источников сильных механических и тепловых воздействий. В основу работы измерительного устройства положен механизм акустической чувствительности, заключающийся в реализации функциональной зависимости величины акустических потерь резонатора от фактической площади контакта между частицами вещества и поверхностью чувствительного элемента датчика, которая, в свою очередь, зависит от статического давления, создаваемого измеряемой средой.

При этом величина акустических потерь колебательной системы датчика определяет изменение амплитуды электрического напряжения на выходных обкладках пьезоэлемента. Аналитическую зависимость выходного сигнала датчика ( $U$ ) от измеряемого уровня ( $H$ ) можно представить упрощенной формулой:

$$U = \frac{U_0}{a + bH}$$

где  $U_0$  – напряжение на выходе автогенератора,  $a$  и  $b$  – параметры, определяемые конструкцией измерительного преобразователя.

Чувствительность данного датчика зависит от многих факторов; физико-механических свойств измеряемой среды, согласованности геометрических размеров, добротности колебательной системы, соотношения резонансных частот, величины акустической связи между вибратором и составным пьезорезонатором. Устройства могут быть использованы как для регистрации достижения определенного уровня заполнения емкости, так и для его непрерывного контроля

На базе составного пьезорезонатора с согласованными размерами был разработан вискозиметр ВР-1, представленный на рис. 6.

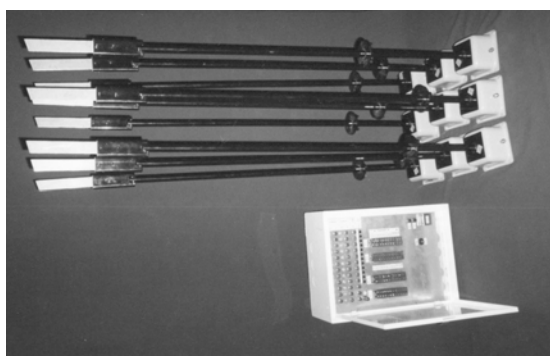


Рисунок 5



Рисунок 6

Принцип работы датчика вязкости основан на реализации зависимости степени затухания колебательной системы вибратора от способности вязкой жидкости демпфировать колебания. В качестве чувствительного элемента использован составной пьезорезонатор, по длине которого устанавливается режим стоячей волны. Чувствительность датчика определяется соотношением геометрических размеров вибратора и степенью согласования его частоты с частотой пьезорезонатора. Вискозиметр может быть использован как для экспресс-анализа так и для автоматизации технологических процессов в химической, нефтехимической, пищевой промышленности, а также в строительстве, энергетике и т.п. Диапазон измеряемой вязкости составляет от единиц до десятков тысяч сантипуаз. Отличительной особенностью данного

устройства от существующих аналогов является то, что рабочая частота колебательной системы датчика составляет десятки кГц, что позволяет повысить помехозащищенность прибора от шумов промышленной частоты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272с.
2. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. – М.: Изд. стандартов, 1970. – 238с.
3. Карпов Н.В., Кириченко Н.А. Колебания, волны, структуры. – М.: Физматлит, 2001. – 496 с.
4. Патент №2193764. Устройство для измерения усилий / Седалищев В.Н., Первухин Б.С., Патрушев Е.М., Коряковцев С.Г.// Открытия, изобретения. 2002. №33.

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, ОСНОВАННЫЕ НА РЕАЛИЗАЦИИ РЕЖИМОВ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ДАТЧИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

5. Патент №2192626. Устройство для измерения усилий / Седалищев В.Н., Первухин Б.С., Патрушев Е.М., Коряковцев С.Г., Русяков М.М. // Открытия, изобретения. 2002. №33.

6. Патент №2083963. Устройство для измерения усилий / Антюфеев А.Н., Госьков П.И., Седалищев В.Н. // Открытия, изобретения. 1997. №9.

7. Патент №2082120. Устройство для измерения усилий / Госьков П.И., Назаренко В.Л., Седалищев В.Н. // Открытия, изобретения. 1997. №17.

8. Патент №2082121. Устройство для измерения усилий / Госьков П.И., Назаренко В.Л., Се-

далищев В.Н. // Открытия, изобретения. 1997. №17.

9. Патент №2140062. Устройство для измерения усилий / Госьков П.И., Седалищев В.Н., Керим А.А., Кривококов Д.Е. // Открытия, изобретения. 1999. №29.

10. Патент №2145411. Ультразвуковой одноканальный способ измерения расхода сред / Антюфеев А.Н., Госьков П.И., Седалищев В.Н. // Открытия, изобретения. 2000. №4.

11. А.С. №1164562. Устройство для измерения усилий / Госьков П.И., Седалищев В.Н. // Открытия, изобретения. 1985. №24.