

УДК 681.586.773

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В.Н. Седалищев, Е.М. Крючков, М.Ю. Ларионов, А.В. Новичихин

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
г. Барнаул

В статье описан метод и устройство для исследования физико-механических и трибологических характеристик поверхностей твердых тел и покрытий, основанный на использовании высокочувствительных режимов связанных колебаний. Ключевая особенность данного метода – то, что при проведении исследований не требуется использовать специальные приспособления, применяемые при традиционных методах.

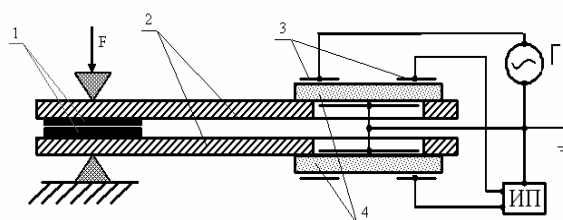
Ключевые слова: связанные колебания, параметры поверхности, акустический контакт

В работе описан метод и устройство для исследования физико-механических и трибологических характеристик поверхностей твердых тел и покрытий, основанный на использовании высокочувствительных режимов связанных колебаний в сложных динамических системах. Особенностью данного метода является то, что при проведении исследований свойств материалов и покрытий не требуется использовать специальные приспособления, применяемые при традиционных методах определения характеристик материалов [1]. В данном измерительном устройстве чувствительным элементом является непосредственно сам контакт исследуемых поверхностей. Для измерения необходимых параметров материалов и покрытий достаточно обеспечить соответствующий режим работы устройства. Например, резонанс синфазных колебаний резонаторов, взаимодействующих между собой через акустический контакт между исследуемыми образцами, может быть использован для исследования упругих характеристик материалов, а нормальная частота синхронизации противофазных колебаний резонаторов – для исследования трибологических характеристик поверхностей.

Принцип работы устройства поясняется структурной схемой экспериментальной модели установки, представленной на рисунке 1. В качестве взаимодействующих резонаторов использовались дисковые пьезоэлектрические трансформаторы (ПЭТ). Исследовался контакт непосредственно между поверхностями пьезорезонаторов, имеющих тонкое покрытие из серебра. Возбуждение колебаний в такой системе осуществлялось от гене-

ратора на одной из нормальных частот связанных колебаний пьезорезонаторов.

Как известно из теории колебаний [2], при достаточно сильной связи между осцилляторами такая система с двумя степенями свободы может иметь две нормальные частоты синхронизации (НЧС). На первой НЧС системы колебания осцилляторов происходят в фазе, а на другой НЧС – в противофазе.



Условные обозначения:

Г – генератор, ИП – измерительный прибор, 1 – контактирующие поверхности, 2 – звукопроводы, 3 – обкладки пьезорезонаторов, 4 – пьезоэлементы

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

В зависимости от физической природы колебательной системы связь между взаимодействующими резонаторами может быть инерционной, упругой или диссипативной. В зависимости от схемы соединения элементов и режимов работы устройства связь между резонаторами может быть последовательной и параллельной, продольной и поперечной, внешней и внутренней. В реальных колебательных системах возможны различные комбинации типов связей и режимы взаимодействия элементов конструкции устройств. При

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ Тел

этом, например, нормальная частота синфазных колебаний резонаторов может быть больше или меньше частоты их противофазных колебаний, может происходить подавление некоторых нормальных частот и т.п. Точное аналитическое описание динамики таких сложных систем весьма затруднительно. Для этой цели удобно использовать методы имитационного и компьютерного моделирования. Используя метод электромеханических аналогий, можно заменить представить измерительный преобразователь (ИП) в виде эквивалентной электрической схемы замещения (ЭЭСЗ).

В рассматриваемом устройстве между взаимодействующими резонаторами реализуются механизмы внешней и внутренней упруго-диссипативной связи. Поэтому в его ЭЭСЗ присутствует последовательная и параллельная резистивно-емкостная связь (рисунки 2).

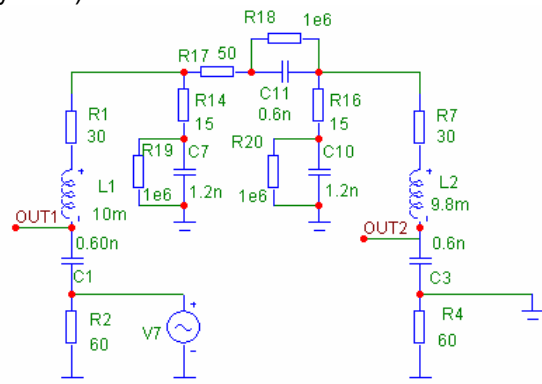


Рисунок 2 – ЭЭСЗ

Применение метода имитационного моделирования измерительного преобразователя с использованием его ЭЭСЗ позволило произвести анализ режимов работы устройства, выявить особенности процессов, происходящих в области контакта поверхностей.

На рисунке 3 приведена амплитудно-частотная характеристика, отражающая режимы связанных колебаний в ЭЭСЗ ИП.

На первой НЧС резонаторы совершают противофазные радиальные колебания (рисунок 3). При этом в области контакта ПЭТ происходят однонаправленные движения плоскостей, как в направлении радиальных колебаний, так и в направлении толщинных колебаний пьезоэлементов. Выходные напряжения ПЭТ находятся в противофазе. На второй НЧС пьезорезонаторы колеблются синфазно, при этом разность фаз между выходными напряжениями ПЭТ близка к нулю. Контактующие поверхности пьезорезона-

торов совершают противоположно направленные движения, как в радиальном направлении, так и в поперечном направлении. На этой частоте колебаний связь участвует в колебаниях, поэтому эквивалентная жесткость резонаторов возрастает за счет продольных и поперечных деформаций микронеровностей.

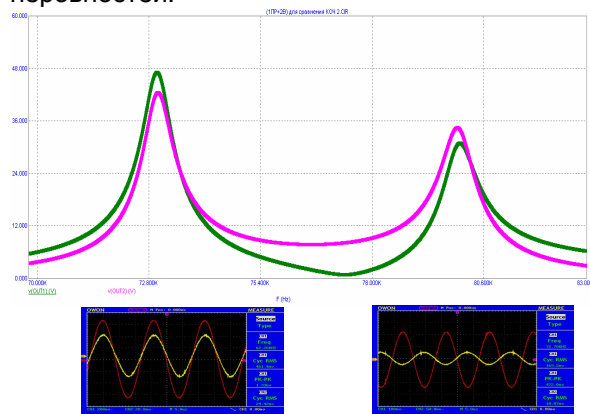


Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика

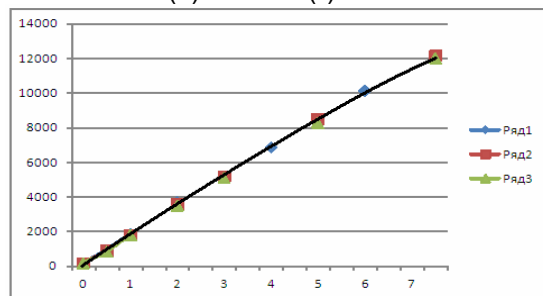
При изменении параметров диссипативно-упругой связи между осцилляторами происходит изменение амплитуд и частот выходных сигналов, снимаемых с генераторных обкладок ПЭТ. Измеряя разность нормальных частот синхронизации в системе, отношение выходных напряжений ПЭТ на частотах их синфазных и противофазных колебаний, можно определить значение коэффициента связи между резонаторами. Это позволит определить параметры элемента связи, выяснить характер протекающих в нем физических процессов.

Таким образом, измеряя параметры связанных колебаний контактирующих резонаторов можно исследовать различные физикомеханические характеристики контакта. Например, можно исследовать твердость материала, оценить шероховатость поверхности, рассчитать модули упругости продольных и сдвиговых деформаций, определить значения коэффициентов трения качения, скольжения, покоя и т.п.

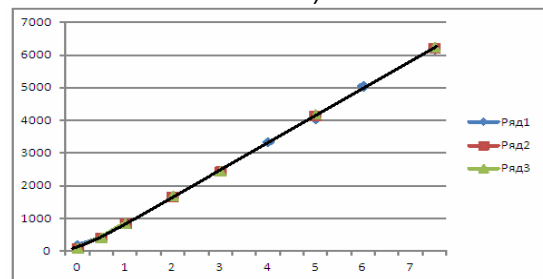
При проведении исследований необходимо обеспечить соответствующие режимы работы устройства и в зависимости от свойств исследуемых материалов нужно правильно установить необходимые уровни возбуждения колебаний резонаторов и усилия сжатия резонаторов в месте их контакта. В связи с этим были проведены исследования влияния уровня возбуждения и величины сжимающего усилия на характеристики

колебательной системы измерительного устройства.

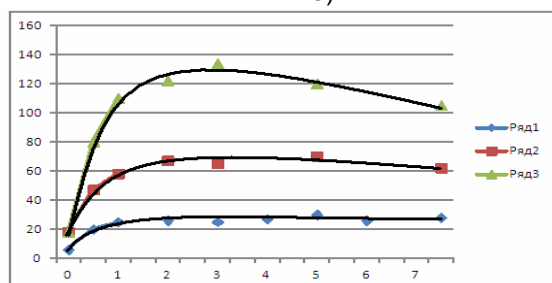
На рисунке 4 приведены зависимости выходных напряжений ведущего ПЭТ в функции напряжения возбуждающего генератора на 1НЧС (а) и 2НЧС (б) при разных усилиях сдвигания, а так же для второго ПЭТ при изменении напряжения возбуждения первого ПЭТ на 1НЧС (в) и 2НЧС (г).



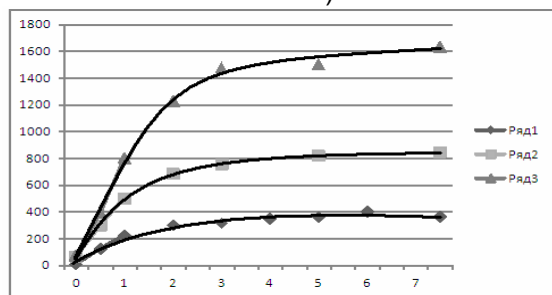
а)



б)



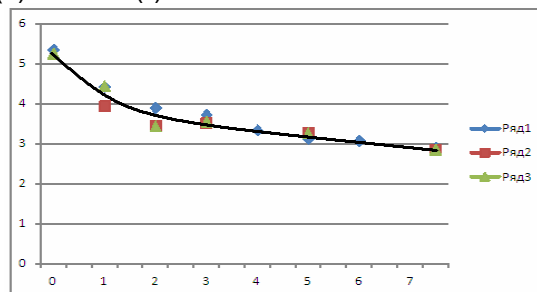
в)



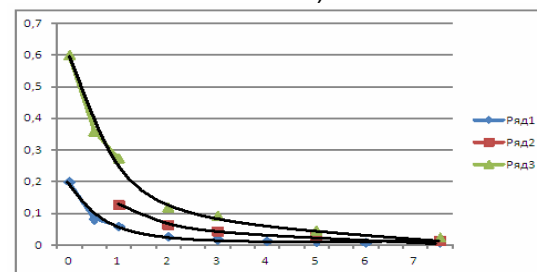
г)

Рисунок 4 – Зависимости выходных напряжений. По оси абсцисс - напряжения возбуждения (в вольтах), по оси ординат - выходное напряжение ПЭТ (в милливольт). Ряды 1, 2 3 – для нарастающих значений усилия сдвигания контакта

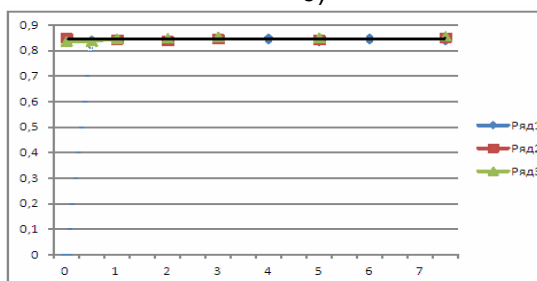
На рисунке 5 приведены зависимости, отражающие влияние уровня напряжения возбуждения колебаний в системе на коэффициент трансформации первого ПЭТ на 1НЧС (а) и 2НЧС (б) и второго ПЭТ на 1НЧС (в) и 2НЧС (г).



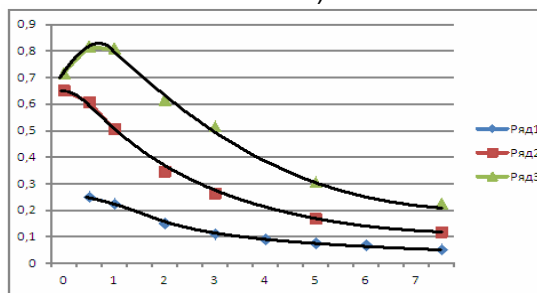
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5 – Влияние уровня напряжения возбуждения колебаний

Вид полученных зависимостей определяются влиянием ряда факторов. В частности, снижение коэффициента трансформации первого ПЭТ на НЧС обусловлено не только потерями энергии на трение в пьезоматериале и в месте контакта резонаторов, но также перераспределением энергии колебаний ме-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

жду ними. На 2НЧС коэффициент трансформации первого ПЭТ остается практически неизменным при изменении напряжения возбуждения. Это объясняется тем, что снижение добротности колебательной системы возбуждаемого ПЭТ компенсируется уменьшением оттока энергии во второй ПЭТ.

На частоте синфазных колебаний связь между резонаторами слабая, по физической природе – упругая, внутренняя. Коэффициент связи при этом определяется отношением продольной упругости контакта к упругости материала пьезорезонатора. На частоте противофазных колебаний ПЭТ связь более сильная, чем при синфазных колебаниях резонаторов. Это связано с появлением дополнительной составляющей механизма упругой связи, обусловленной наличием поперечных деформаций микронеровностей в результате противофазных радиальных движений резонаторов. При увеличении усилия сдвигания контакта связь между резонаторами возрастает. Это происходит из-за увеличения фактической площади акустического контакта между пьезорезонаторами. В результате возрастает амплитуда колебаний ведомого ПЭТ, увеличивается отношение выходного напряжения ведомого ПЭТ к выходному напряжению ведущего ПЭТ.

По полученным в результате измерений значениям КРАК можно определить значения коэффициентов связи для соответствующих частот связанных колебаний осцилляторов, воспользовавшись для этого известным из теории колебаний соотношением:

$$\frac{A}{B} = \frac{1 \pm \sqrt{1 + \sigma^2}}{\sigma}, \quad \sigma \approx \frac{\gamma}{\xi},$$

где σ – коэффициент связанности; γ – коэффициент связи; ξ – относительная расстройка парциальных частот осцилляторов; A и B – амплитуды колебаний возбуждаемого и ведомого осцилляторов.

При слабой связанности резонаторов на частоте их синфазных колебаний (1НЧС) приближенно можно считать [3, 4]:

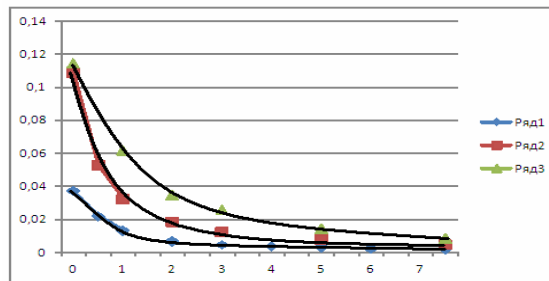
$$\left(\frac{U_2}{U_1}\right)_1 \approx \frac{\sigma_1}{2} \approx \frac{\gamma_1}{2 \cdot \xi}, \quad \gamma_1 \approx 2 \cdot \xi \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)_1, \quad \gamma_1 \approx \frac{C_0}{C_1},$$

U – выходные напряжения ПЭТ, C – емкости контуров и элемента связи.

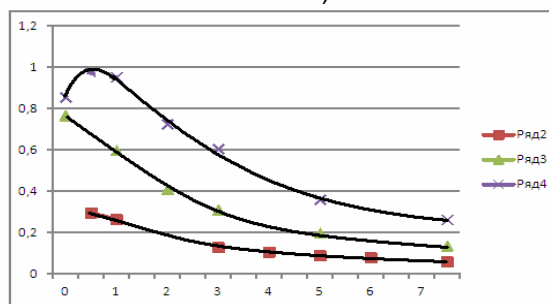
На частоте противофазных колебаний пьезорезонаторов (2НЧС) связанность высокая, поэтому:

$$\left(\frac{U_2}{U_1}\right)_2 \approx \frac{\sigma_2}{1 - \sigma_2} \approx \frac{\gamma_2}{\xi - \gamma_2}, \quad \gamma_2 \approx \frac{\xi \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)_2}{1 - \left(\frac{U_2}{U_1}\right)_2}, \quad \gamma_2 \approx \frac{C_0}{C_2}.$$

На рисунке 6 приведены зависимости КРАК от величины напряжения возбуждения ПЭТ на первой (а) и второй (б) НЧС при разных усилиях сдвигания контакта.



а)



б)

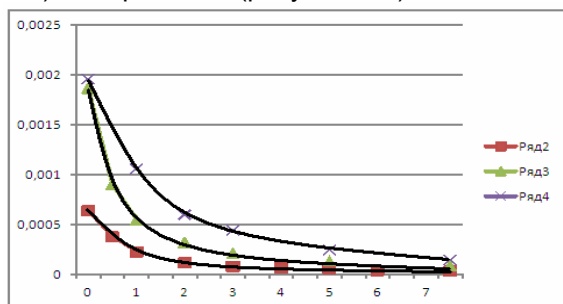
Рисунок 6 – Зависимости КРАК от величины напряжения возбуждения

Как следует из приведенных графиков, при увеличении сдвигающих усилий максимум графика, отражающего зависимость КРАК от амплитуды колебаний ПЭТ на 2НЧС, смещается вправо, в область больших амплитуд колебаний резонаторов. Это можно объяснить тем, что при увеличении амплитуд противофазных движений резонаторов появляется проскальзывание в месте их контакта. В результате возрастания потерь на трение уменьшается доля энергии, приходящая к ведомому ПЭТ со стороны возбуждаемого.

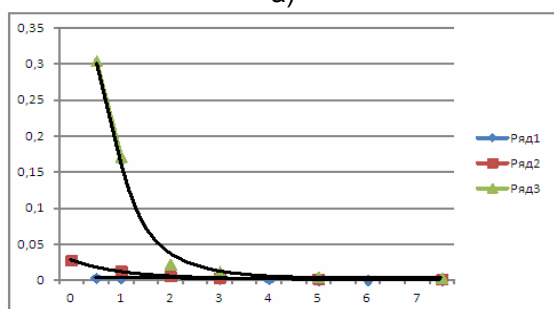
На основании полученных зависимостей можно сделать вывод о возможности использования отношения выходных напряжений на частоте противофазных колебаний ПЭТ в качестве информативного параметра, для регистрации момента появления проскальзывания между контактирующими поверхностями. Зависимость такого критического режима взаимодействия резонаторов от величины напряжения возбуждения колебаний в системе при постоянном усилии сдвигания контактирующих поверхностей может быть использована для определения коэффициента трения трогания материалов.

Появление проскальзывания контактирующих поверхностей приводит также к существенному снижению коэффициента связи на частоте противофазных колебаний резонаторов.

наторов. На рисунке 7 приведены зависимости коэффициентов связи от величины входного напряжения для первой НЧС (рисунок 7, а) и второй НЧС (рисунок 7, б).



а)



б)

Рисунок 7 – Зависимости коэффициентов связи от величины входного напряжения

На рисунке 8 приведены графики изменения отношения коэффициентов связи противофазных и синфазных колебаний резонаторов в функции напряжения возбуждения колебаний в системе при разных усилиях сдвигания контакта между резонаторами.

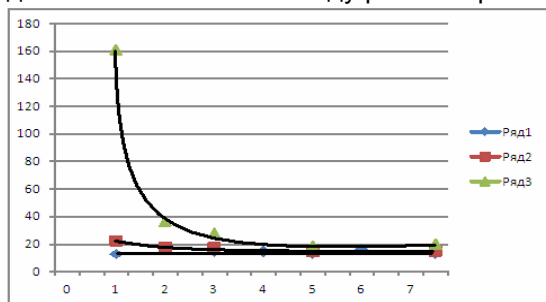


Рисунок 8 – Изменения отношения коэффициентов связи

На основании полученных зависимостей можно сделать вывод о том, что при противофазных колебаниях связь между резонаторами намного больше, чем при их синфазных колебаниях. Особенно сильно такое различие в механизмах взаимодействия контактирующих поверхностей проявляется при достаточно больших усилиях сдвигания контакта между резонаторами и малых амплитудах противофазных колебаний резонаторов. При

появлении проскальзывания между резонаторами отношение коэффициентов связи на частотах синфазных и противофазных колебаний практически не зависит от напряжения возбуждающего генератора. Очевидно, это связано с тем, что при этом реализуются одинаковые механизмы взаимодействия между контактирующими поверхностями.

Таким образом, изменяя усилия сжатия контакта между резонаторами, напряжение возбуждения ПЭТ, режимы связанных колебаний в системе, можно реализовать различные механизмы взаимодействия контактирующих поверхностей. Измеряя выходные параметры взаимодействующих пьезорезонаторов, (например, выходные напряжения и резонансные частоты связанных колебаний ПЭТ) можно определить физико-механические и трибологические характеристики исследуемых материалов.

К достоинствам предложенного метода измерения физико-механических и трибологических характеристик твердых тел можно отнести следующие факторы:

- метод контроля является неразрушающим;
- метод может использоваться для исследования характеристик тонких покрытий (в том числе микро - и нанопокровов);
- при исследовании различных характеристик материалов не требуется смены измерительных приспособлений;
- измерительное устройство может быть выполнено компактным, малогабаритным, не дорогим, потребляющим мало энергии, удобным в эксплуатации и обслуживании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев. С. И., Алехин В.П.. Испытание материалов непрерывным вдавливанием. Машиностроение, М. 1990. 224 С.
2. Андронов А.А. Теория колебаний/ А.А. Андронов, С.Э. Хайкин, А.А. Витт. – М.: Наука, 1981. 563 с.
3. Седалищев В. Н., Хомутов О. И. Высокочувствительные пьезорезонансные датчики с использованием связанных колебаний для экстремальных условий эксплуатации. – Барнаул: АлтГТУ, 2006. 184 С.
4. Седалищев В. Н. Измерительные устройства, основанные на реализации связанных колебаний в пьезорезонансных датчиковых структурах. // Ползуновский вестник. 2006. №2. – С. 264-270.

Седалищев Виктор Николаевич – д.т.н., профессор тел.: (3852) 26-04-92, e-mail: Sedalischew@mail.ru; **Новичихин Андрей Викторович** – аспирант; **Крючков Евгений Михайлович** – аспирант; **Ларионов Максим Юрьевич** – аспирант.