

УДК 681.586.773

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ДАТЧИКОВ НА СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЯХ

¹В. В. Белозерских, ²Е. М. Патрушев, ²Т. В. Патрушева,
¹В. Н. Седалищев, ¹Я. С. Сергеева

¹Алтайский государственный университет,

²Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул

Статья посвящена исследованию возможности создания многофункциональных измерительных преобразователей на основе колебательных систем с двумя степенями свободы.

Ключевые слова: связанные колебания, физико-механические и трибологические характеристики поверхностей твердых тел и покрытий, акустический контакт, статические усилия.

В настоящее время в промышленности, энергетике, сельском хозяйстве и других отраслях существует потребность в высокочувствительных средствах измерений, способных работать в условиях действия сильных дестабилизирующих факторов (температур, механических воздействий и т.п.). Для этих целей чаще всего применяют электромеханические измерительные преобразователи, реализующие высокочувствительные резонансные режимы работы. В том числе, например, для измерения вязкости, плотности, уровня жидких сред и сыпучих материалов широко применяют различные типы пьезорезонансных датчиков (ПРД), характеризующиеся малыми размерами, низкой стоимостью, хорошей сопрягаемостью с микропроцессорной техникой, высокой чувствительностью и точностью измерений. К достоинствам датчиков такого типа относится и то, что модулируемыми параметрами их эквивалентной электрической схемы замещения (ЭЭСЗ) могут являться активное сопротивление, индуктивность и емкость, что предоставляет возможность создания на их основе многофункциональных датчиков.

Одним из возможных направлений дальнейшего совершенствования ПРД может служить разработка высокочувствительных, многофункциональных датчиков, основанных на модуляции связанных колебаний пьезорезонаторов (МСК ПРД) [1-9]. Такие измерительные устройства являются нелинейными

измерительными устройствами, поэтому их чувствительность зависит от многих факторов. Изменение в функции измеряемого воздействия параметров осцилляторов и элементов связи между ними обуславливает изменение режимов связанных колебаний в системе. В результате перераспределения колебательной энергии между осцилляторами происходит изменение соотношения амплитуд их колебаний. С целью оптимизации схем включения ПР, режимов работы МСК ПРД, их конструктивного исполнения необходимо произвести оценку чувствительности и избирательной способности измерительных различных вариантов построения преобразователей (ИП) такого типа.

При создании датчиков такого типа одной из важнейших является проблема, связанная с обеспечением избирательности процесса получения первичной измерительной информации за счет повышения чувствительности к измеряемому параметру и снижения чувствительности к влиянию дестабилизирующих факторов.

Для оценки чувствительности и эффективности процесса измерительного преобразования, выражаемого функцией $y = \varphi(x; t)$, предлагается использовать коэффициенты относительной чувствительности (КОЧ) и эффективности (Кэ) измерительного процесса [1]:

$$\begin{aligned}
 КОЧ &= \frac{\partial y}{\partial x} \Big/ \frac{y}{x} = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \frac{y}{x} = \frac{S_H}{S_A} \\
 Кэфф &\approx \left(\frac{dy}{y} \Big/ \frac{dx}{x} \right)_t \approx \left(\frac{S_H}{S_L} \right)_t \\
 &\approx \left(\frac{dy}{y} \Big/ \frac{dt}{t} \right)_x \approx \left(\frac{S_H}{S_L} \right)_x
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Как следует из приведенной формулы (1), данные коэффициенты являются характеристикой нелинейности процесса измерительного преобразования по отношению к измеряемой величине и дестабилизирующим факторам. В связи с этим они могут быть использованы для оценки избирательной способности режимов работы и вариантов конструктивного исполнения измерительных преобразователей, основанных на модуляции связанных колебаний пьезорезонаторов. Конструктивно такие устройства могут состоять из одного монолитного пьезоэлемента, двух и более пьезорезонаторов, в том числе и составных. В качестве элемента связи между ними может выступать, в том числе, и исследуемая среда.

В общем случае нужно учитывать то, что электромеханический резонатор является системой с распределёнными параметрами, в которой могут возбуждаться различные моды колебаний и типы связи между ними. Поэтому эквивалентная электрическая схема замещения таких устройств имеет сложный вид и может состоять из большого числа взаимодействующих между собой контуров. В связи с тем, что процессы в автоколебательных системах описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, в большинстве случаев возможно только приближенное решение таких систем уравнений. При этом вводятся те или иные допущения в зависимости от особенностей колебательных систем и задач, которые ставятся при их исследовании. Сложность и особенности теоретического анализа колебаний в значительной степени зависят от числа степеней свободы системы.

Для исследования режимов работы МСК ПРД, оценки их метрологических характеристик был выполнен анализ исследования связанных колебаний в системах с двумя степенями свободы [1-9].

В теории колебаний к настоящему времени достаточно полно рассмотрены процессы взаимодействия в системах с конечным числом степеней свободы, в системах с рас-

пределенными параметрами, но при этом практически отсутствуют исследования метрологических характеристик ИП, принцип работы которых основан на реализации связанных колебаний в сложных динамических системах. Конструкции чувствительных элементов таких ПРД в упрощенном виде могут быть представлены в виде эквивалентных электрических схем замещения (ЭЭСЗ). Для примера на рисунке 1 представлена ЭЭСЗ МСК ПРД с двумя степенями свободы.

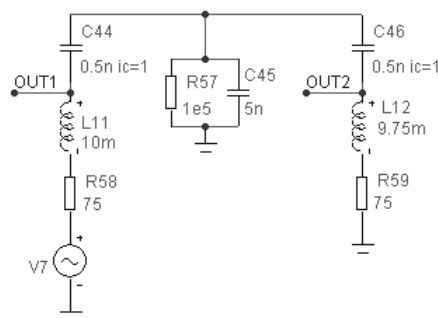


Рисунок 1 – Эквивалентная электрическая схема замещения измерительного преобразователя с двумя степенями свободы

В данной работе представлены результаты анализа возможности использования связанных колебаний ПР, с целью повышения чувствительности и избирательной способности процесса первичного преобразования. Моделирование производилось с использованием пакета прикладных программ Mathcad, Microcap. Для этой цели использовались соотношения для активного и реактивного входного сопротивления системы с двумя степенями свободы:

$$R_{ЭКВ} = R_1 + R_2 \cdot \frac{p^2 \cdot \gamma^2 \cdot L_1 \cdot L_2}{(R_2)^2 + \left[p \cdot L_2 - \frac{1}{p \cdot [(C_2)^2]} \right]^2}
 \tag{2}$$

$$X_{ЭКВ} = \left[p \cdot L_1 - \frac{1}{p \cdot [(C_1)^2]} \right] - \frac{p^2 \cdot \gamma^2 \cdot L_1 \cdot L_2}{(R_2)^2 + \left[p \cdot L_2 - \frac{1}{p \cdot [(C_2)^2]} \right]^2} \cdot \left[p \cdot L_2 - \frac{1}{p \cdot [(C_2)^2]} \right]
 \tag{3}$$

При этом формулы для напряжений на конденсаторах ведущего и ведомого осцилляторов, отнесенные к напряжению генератора, будут иметь вид:

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ДАТЧИКОВ НА СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЯХ

$$\frac{1}{p \cdot C_1} \sqrt{\left[R_1 + R_2 \cdot \frac{p^2 \cdot \gamma^2 \cdot L_1 \cdot L_2}{(R_2)^2 + \left(p \cdot L_2 - \frac{1}{p \cdot C_2} \right)^2} \right]^2 + \left[\left(p \cdot L_1 - \frac{1}{p \cdot C_1} \right) - \frac{p^2 \cdot \gamma^2 \cdot L_1 \cdot L_2}{(R_2)^2 + \left(p \cdot L_2 - \frac{1}{p \cdot C_2} \right)^2} \right]^2} \quad (4)$$

$$\frac{\left[\left(p \cdot L_1 - \frac{1}{p \cdot C_1} \right) - \frac{p^2 \cdot \gamma^2 \cdot L_1 \cdot L_2}{(R_2)^2 + \left(p \cdot L_2 - \frac{1}{p \cdot C_2} \right)^2} \right]^2}{p \cdot \gamma \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}} + \frac{\left[\left(R_2 \right)^2 + \left(p \cdot L_2 - \frac{1}{p \cdot C_2} \right)^2 \right] \cdot \left[R_1 + R_2 \cdot \frac{p^2 \cdot \gamma^2 \cdot L_1 \cdot L_2}{(R_2)^2 + \left(p \cdot L_2 - \frac{1}{p \cdot C_2} \right)^2} \right]^2}{\frac{1}{p \cdot C_2} + \left[\left(p \cdot L_1 - \frac{1}{p \cdot C_1} \right) - \frac{p^2 \cdot \gamma^2 \cdot L_1 \cdot L_2}{(R_2)^2 + \left(p \cdot L_2 - \frac{1}{p \cdot C_2} \right)^2} \right]^2} \quad (5)$$

В общем случае модулируемыми параметрами первичного измерительного преобразователя могут являться параметры ЭЭСЗ обоих осцилляторов и коэффициент связи между ними. Рабочими режимами таких устройств могут быть синхронные, асинхронные связанные колебания ПР, бифуркационные процессы в системе. В наиболее простом случае при использовании схем с одним генератором в таких системах устанавливается синфазный или противофазный синхронный режим связанных колебаний осцилляторов. В качестве выходного сигнала для таких датчиков могут служить амплитуды, частоты и разность фаз связанных колебаний осцилляторов.

Для МСК ПРД, предназначенного для измерения вязкости, плотности и упругих характеристик различных сред модулируемыми параметрами ЭЭСЗ могут являться активное сопротивление, индуктивность и емкость одного из ПР. В качестве выходного сигнала датчика использовались напряжения на емкостях ЭЭСЗ осцилляторов, соответствующие напряжениям на обкладках ПР. Осциллятор, к которому подключен генератор, будет являться ведущим, а чувствительный элемент, например, в виде металлического вибратора – ведомым [4].

На приведенных ниже рисунках представлены результаты имитационного моделирования характеристик колебательной системы датчика, в котором под действием измеряемых параметров происходит изменение активного сопротивления, емкости и индуктивности ведомого осциллятора.

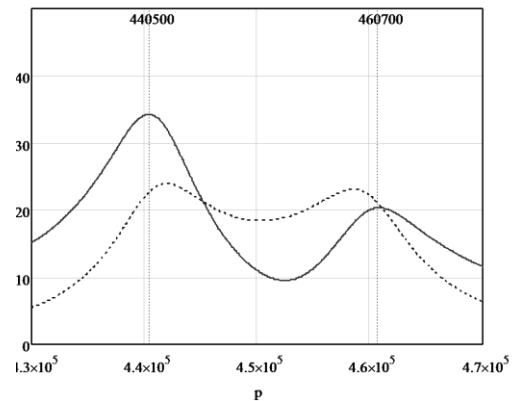


Рисунок 2 – АЧХ колебательной системы МСК ПРД с сильной связанностью между осцилляторами

При возбуждении колебаний в системе могут устанавливаться режимы связанных колебаний осцилляторов, характеризующиеся наличием резонансов на нормальных частотах синфазных и противофазных колебаний (1НЧС и 2НЧС).

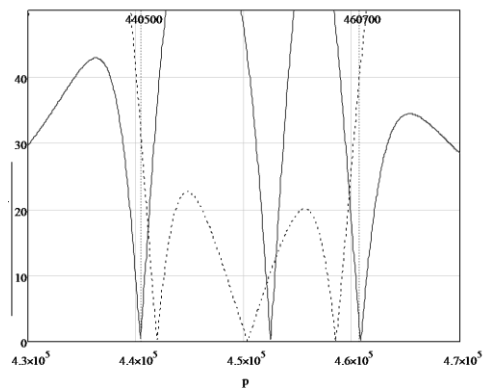


Рисунок 3 – Частотные зависимости КОЧ к изменению частоты колебаний для напряжений на емкостях ведущего (сплошная линия) и ведомого (пунктирная линия) осцилляторов

Из приведенных на рисунках 2 и 3 графиков следует, что максимумы и минимумы КОЧ к изменению частоты колебаний в системе для ведущего и ведомого осцилляторов отличаются по величине и достигаются на разных частотах.

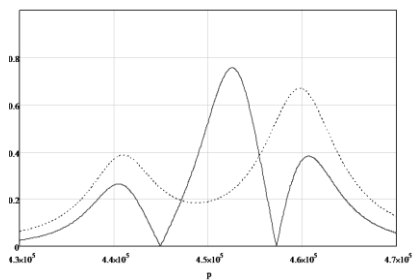


Рисунок 4 - Частотная зависимость КОЧ амплитуд колебаний в ведущем (сплошная линия) и ведомом (пунктирная линия) осцилляторах к изменению активного сопротивления в ведомом осцилляторе

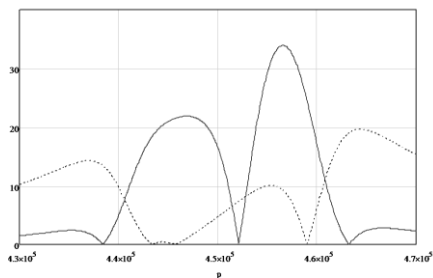


Рисунок 5 - Частотные зависимости КОЧ амплитуд колебаний в ведущем и ведомом осцилляторах к изменению емкости в ведомом осцилляторе

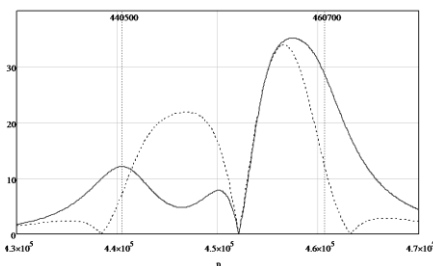


Рисунок 6 – Частотные зависимости КОЧ амплитуд колебаний в ведущем осцилляторе к изменению индуктивности и емкости в ведомом осцилляторе

Из приведенных графиков следует, что при определенных частотах колебаний в системе реализуются режимы высокой и низкой чувствительности к изменению определенных параметров ЭЭС3 датчика. Из этого следует, что при рациональном выборе соответствующих режимов работы устройства можно обеспечить высокую эффективность (избирательность) измерения конкретных параметров ЭЭС3 датчика, соответственно, объекта измерения [6].

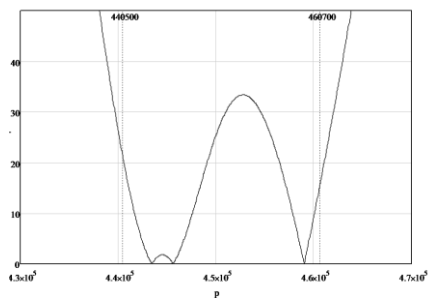


Рисунок 7 – Частотная зависимость Кэ для ведомого осциллятора к измерению емкости и при дестабилизирующем изменении его добротности

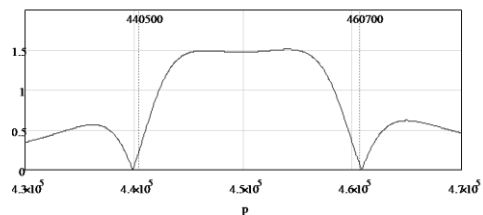
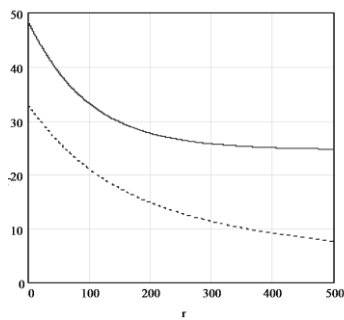
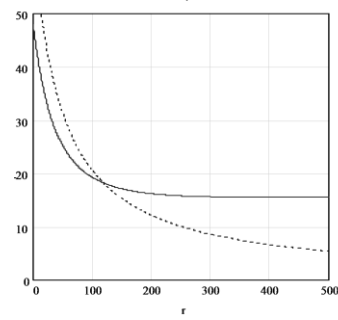


Рисунок 8 – КОЧ амплитуды колебаний ведомого осциллятора к изменению коэффициента связи в системе

На рисунках приведены зависимости напряжений на емкостях ведущего и ведомого осцилляторов к изменению активного сопротивления и емкости в ведомом осцилляторе, а так же КОЧ к изменению этих параметров.



а)

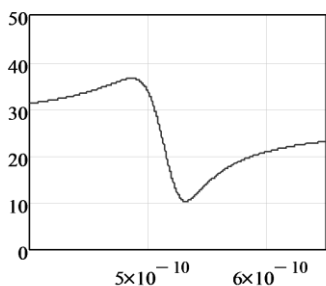


б)

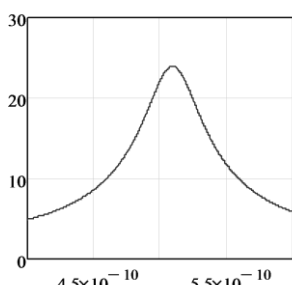
Рисунок 9 – Зависимости напряжений на емкостях ведущего (сплошная линия) и ведомого (пунктирная линия) осцилляторов на 1НЧ3

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ДАТЧИКОВ НА СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЯХ

(а) и 2НЧС (б) от величины активного сопротивления в цепи ведомого контура

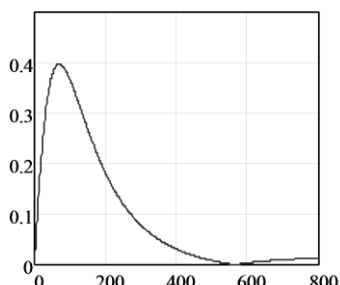


а)
б)

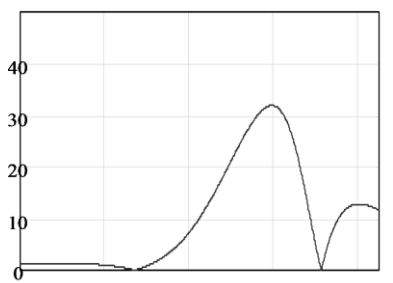


б)

Рисунок 10 – Зависимости напряжений на емкостях ведущего (а) и ведомого (б) осцилляторов на 1НЧС от величины емкости в цепи ведомого контура



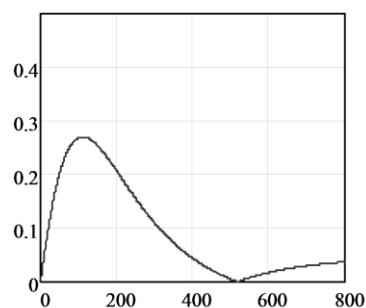
а)



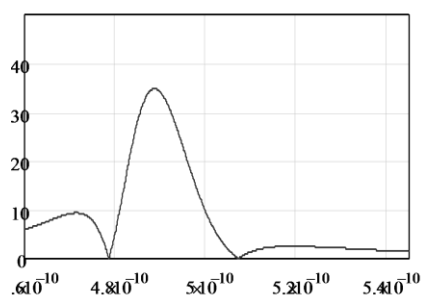
б)

Рисунок 11 – КОЧ напряжения на емкости ведущего контура к изменению активного со-

противления (а) и емкости (б) в ведомом контуре на 1НЧС

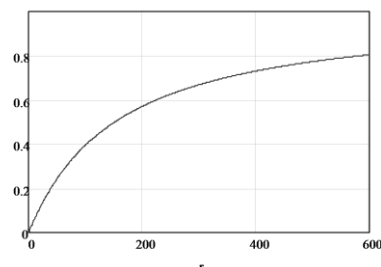


а)

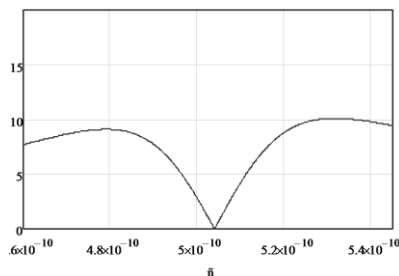


б)

Рисунок 12 – КОЧ напряжения на емкости ведущего контура к изменению активного сопротивления (а) и емкости (б) в ведомом контуре на 2НЧС



а)



б)

Рисунок 23 – КОЧ напряжения на емкости ведомого контура к изменению активного сопротивления (а) и емкости (б) на 1НЧС

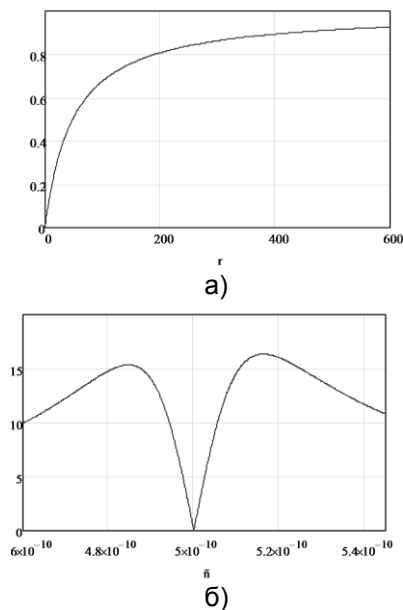


Рисунок 13 – КОЧ напряжения на емкости ведомого контура к изменению активного сопротивления (а) и емкости (б) на 2НЧС

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

Режим высокой чувствительности выходного напряжения ведущего осциллятора к изменению активного сопротивления в цепи ведомого осциллятора (например, при измерении вязкости жидкой среды с использованием составного ПЭТ) достигается при согласовании импедансов ведущего и ведомого осцилляторов.

Чувствительность измерительного преобразователя такого типа зависит от уровня связанности между осцилляторами. Для датчиков с амплитудным выходом режим максимальной чувствительности к изменениям параметров ведомого осциллятора достигается при согласовании уровня связи в системе с ее добротностью.

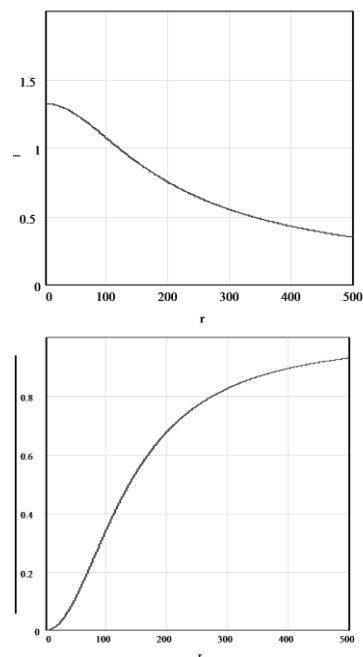


Рисунок 14 – Зависимости отношения колебаний в контурах и его КОЧ в функции величины активного сопротивления в цепи ведомого контура

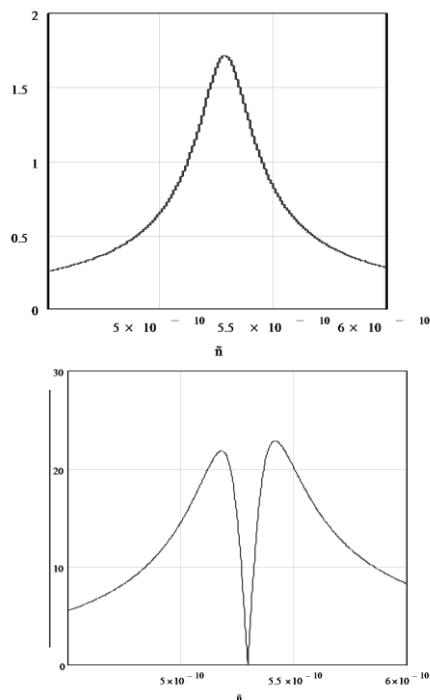


Рисунок 15 – Зависимость отношения амплитуд колебаний в контурах (а) и его КОЧ (б) от величины емкости в цепи ведомого контура

С увеличением значения активного сопротивления ведомого осциллятора чувствительность датчика к его изменению возрастает.

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ДАТЧИКОВ НА СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Чувствительность системы взаимосвязанных осцилляторов к изменению емкости в цепи ведомого осциллятора сильно зависит от величины расстройки собственных частот осцилляторов и достигает максимальных значений в окрестностях значения, близкого к величине емкости ведущего осциллятора.

Как следует из приведенных графиков, чувствительность МСК ИП существенно зависит степени связи и относительной расстройки осцилляторов. В связи с этим важной задачей при разработке измерительных устройств такого типа является оптимизация конструкции и режимов работы устройства [8].

На рисунке 15 представлена зависимость КОЧ выходного напряжения на емкости ведомого осциллятора от величины уровня связи в системе.

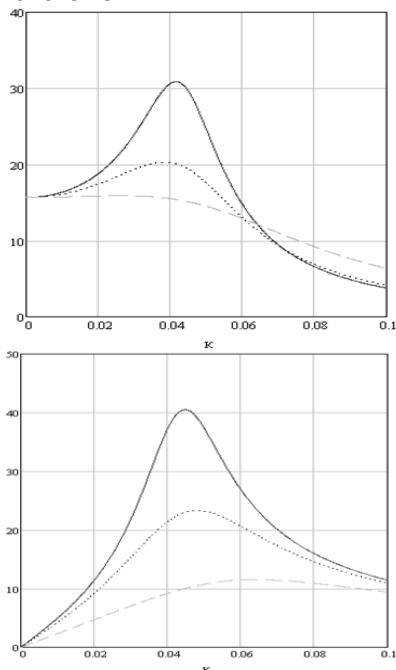


Рисунок 16 - Зависимость напряжения на емкости ведущего осциллятора от величины коэффициента связи при разных уровнях добротности вибратора (— высокая добротность вибратора, критическая добротность вибратора, — — низкая добротность вибратора)

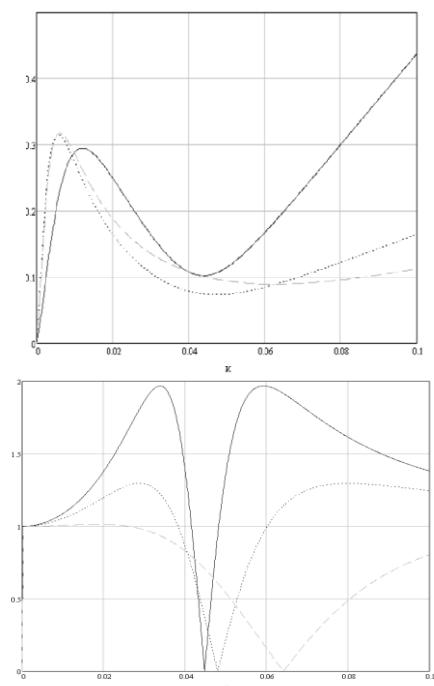


Рисунок 17 - Зависимость КОЧ напряжения на емкости ведущего и ведомого осцилляторов в функции коэффициента связи между ними при — высокой, критической, — — низкой добротности вибратора

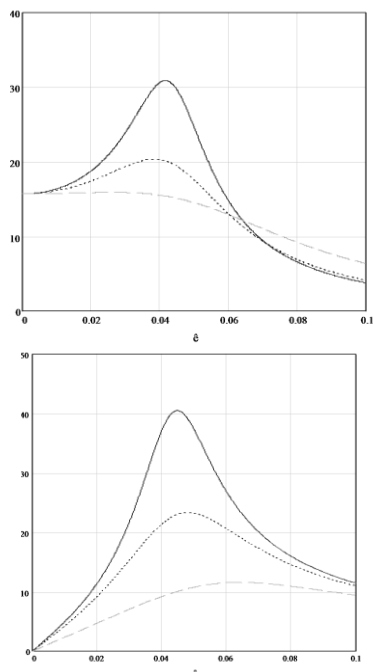


Рисунок 18 - Напряжение на емкости ведущего (а) и ведомого (б) осцилляторов в функции коэффициента связи при — высокой, критической, — — низкой добротностях ведомого осциллятора

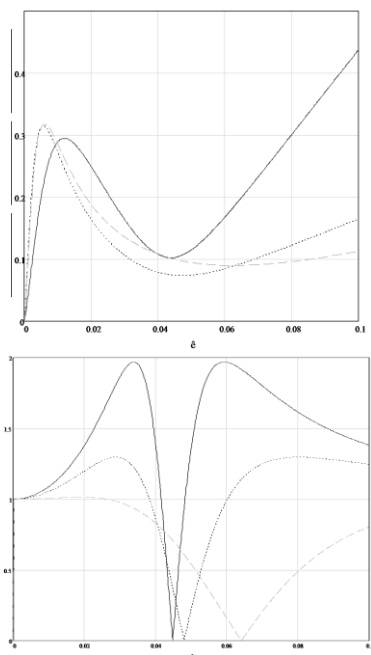


Рисунок 19 - КОЧ напряжений на емкости ведущего (а) и ведомого (б) осцилляторов к изменению коэффициента связи при — высокой, критической, — — низкой добротностях ведомого осциллятора

Чувствительность МСК датчиков с амплитудным и частотным выходом зависит от величины коэффициента взаимодействия осцилляторов. При отсутствии взаимодействия между осцилляторами МСК датчик представляет собой линейное измерительное устройство и его КОЧ равен единице. В режиме сильной связанности в системе чувствительность МСК датчика стремится к нулю, так как любое изменение параметров одного из осцилляторов приводит к практически пропорциональному изменению параметров колебаний в обоих осцилляторах. При использовании в качестве выходного сигнала МСК датчика разности НЧС увеличение взаимодействия осцилляторов приводит к увеличению разности НЧС, и, соответственно, к увеличению чувствительности датчика. При отсутствии связанности осцилляторов разность НЧС равна нулю и изменение параметров у одного из осцилляторов никак не сказывается на режиме работы другого осциллятора.

При реализации механизма тензочувствительности измеряемым параметром является упругость вибратора, а дестабилизирующим – изменение его активного сопротивления. При реализации механизма акусточувствительности измеряемым параметром

является, наоборот, изменение активного сопротивления, а дестабилизирующим фактором – изменение жесткости вибратора.

В связи с тем, что при изменении уровня связи, относительной расстройки частот в системе, схемы подключения генератора изменяются КОЧ по отношению к измеряемым и дестабилизирующим факторам, необходимо производить оценку чувствительности и эффективности для конкретных вариантов построения МСК ИП [9].

Выводы:

Для повышения эффективности измерительного процесса для датчиков, принцип работы которых основан на модуляции добротности осцилляторов, рекомендуется использовать схемы с одним выходом, а в качестве чувствительного элемента использовать осцилляторы с наименьшими собственными частотами.

Максимальную эффективность МСК датчика емкостного типа обеспечивает схема, возбуждаемая на частоте противофазных колебаний в системе.

Наименьшую эффективность измерения обеспечивает схема, возбуждаемая на 1НЧС, с использованием в качестве выходного сигнала амплитуду колебаний низкочастотного осциллятора.

Эффективность МСК датчиков с дифференциальным выходом существенно выше, чем у датчиков с одним выходным сигналом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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. –

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ДАТЧИКОВ НА СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Библиогр.; с. 180 – 184. – 100 экз. - ISBN 5-7568-0669-5

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

6. Седалищев, В.Н. Пьезорезонансные датчики на связанных колебаниях // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2005. - №11. - С. 41 - 42.

7. Седалищев, В.Н. Измерительные устройства, основанные на реализации режимов связанных колебаний в пьезорезонансных датчиковых структурах // Ползуновский вестник. - 2006. - № 2. – С. 264 – 269.

8. Седалищев, В.Н. Особенности конструирования пьезоэлектрических измерительных устройств на связанных колебаниях // Приборы и сис-

темы. 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, (3852) 380-751, e-mail: sedalischew@mail.ru;

Патрушева Татьяна Васильевна - старший преподаватель, тел.(3852)-290913, e-mail: attractor@list.ru;

Патрушев Егор Михайлович – к.т.н, доцент, тел. (3852)- 290913, e-mail: attractor13@gmail.com;

Белозерский Василий Вениаминович – ст. преподаватель;

Сергеева Яна Сергеевна – аспирантка.