

Использование нелинейных процессов в динамических системах как способ повышения эффективности измерительных устройств

В.В. Белозерских, В.Н. Седалищев, Я.С. Сергеева

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Utilization of Nonlinear Processes in Dynamic Systems for Efficiency Enhancement of Measuring Devices

V.V. Belozerskikh, V.N. Sedalichev, Ya.S. Sergeeva

Altai State University (Barnaul, Russia)

Обоснована целесообразность использования нелинейных процессов в сложных динамических системах с целью повышения эффективности измерительных устройств на их основе. Приведен анализ чувствительности и избирательной способности резонансных методов измерения, в том числе с использованием связанных колебаний в пьезорезонансных структурах. Показано, что существуют определенные частоты колебаний, при которых одновременно могут обеспечиваться режимы высокой чувствительности к изменению одних параметров колебательной системы датчика и низкой чувствительности — к изменению других ее параметров. На основании этого сделан следующий вывод: оптимизируя конструкцию и режим работы измерительного преобразователя, можно обеспечить не только высокую чувствительность, но и эффективность (избирательность) измерительного процесса. Показано, что в системах с одной степенью свободы высокая эффективность измерения емкости конденсатора достигается при использовании в качестве выходного сигнала датчика напряжения на индуктивности, а измерение индуктивности — по напряжению на конденсаторе эквивалентной схемы замещения измерительного преобразователя. В системах с двумя степенями свободы режимы высокой чувствительности и эффективности измерения обеспечиваются при возбуждении колебаний на соответствующих нормальных частотах синхронизации системы.

Ключевые слова: связанные колебания, амплитудно-частотная характеристика, динамическая система, резонанс, чувствительность, эффективность.

DOI 10.14258/izvasu(2016)1-03

В настоящее время в связи с увеличением количества и разнообразия контролируемых параметров технологических процессов, характеристик материа-

In this paper, the usefulness of nonlinear processes in complex dynamic systems for efficiency enhancement of measuring devices based on such systems is substantiated. The analysis of sensitivity and selectivity of resonance measurement techniques including ones based on coupled oscillations in piezoresonance structures is provided. It is demonstrated that there are certain specific oscillation frequencies with high sensitivity to changes in several parameters of sensor oscillation system and low sensitivity to changes in other parameters simultaneously. Thus, it is concluded that optimizing design and operational modes of measuring device would provide the possibility to enhance sensitivity and selectivity of a measurement process. It is shown that one-degree-of-freedom systems are capable of producing highly efficient capacity measurement of a capacitor when the sensor output is the voltage on inductance; and inductance measurement when sensor output is the capacitor voltage in the equivalent circuit of the sensor. Two-degree-of-freedom systems demonstrate high efficiency and sensitivity for frequencies that correspond to normal synchronization frequencies of the systems.

Key words: coupled oscillations, frequency response characteristic, dynamic system, resonance, sensitivity, efficiency.

лов и т. п. требуется всевозрастающий парк соответствующих измерительных устройств. Одним из подходов к решению данной проблемы может явиться

разработка многофункциональных датчиков, применимых для одновременного измерения нескольких физических величин. Создание измерительных устройств такого типа позволит существенно сократить номенклатуру и количество применяемых датчиков, расширит их функциональные возможности и область применения.

Необходимо отметить, что в ряде случаев не представляется возможным реализовывать прямые методы измерения физических величин, параметров объектов, характеристик материалов и т. п. по причине недостаточной чувствительности и низкой избирательной способности существующих методов и средств измерений. Например, для измерения вязкости жидких сред, трибологических характеристик твердых тел и покрытий широко применяют методы и средства, основанные на поступательном взаимном перемещении чувствительного элемента датчика и исследуемой среды, но при этом не представляется возможным осуществлять измерение плотности и упругих свойств среды. В настоящее время для этой цели все более широкое применение находят измерительные устройства вибрационного типа, характеризующиеся высокой чувствительностью измерений [1–6]. Например, в медицине требуется определять вязкоупругие характеристики плазмы крови и других биологических растворов, на транспорте и в машиностроении нужно контролировать вязкоупругие характеристики смазочных средств, в нефтедобывающей и химической промышленности необходимо производить контроль вязкоупругих характеристик жидких сред и т. п.

Оценку чувствительности процесса измерительного преобразования, выражаемого функцией $y = \varphi(x;t)$, можно осуществить с использованием коэффициента относительной чувствительности (КОЧ), представляющего собой частное от деления относительных приращений выходного сигнала датчика (y) и измеряемой физической величины (x) [6]:

$$\text{КОЧ} = \frac{\frac{\partial y}{\partial x} / y}{\frac{\partial x}{\partial x} / x} = \frac{S_H}{S_L} \quad (1)$$

В качестве показателя избирательности процесса измерительного преобразования (K_ξ) предлагается использовать соотношение коэффициентов относительной чувствительности выходного сигнала датчика к изменению физической величины (x) и дестабилизирующего фактора (t) [6]:

$$K_\xi \approx \frac{\left(\frac{dy}{dx} / \frac{dx}{x}\right)_t}{\left(\frac{dy}{dt} / \frac{dt}{t}\right)_x} \approx \frac{\left(\frac{S_H}{S_L}\right)_t}{\left(\frac{S_H}{S_L}\right)_x} \quad (2)$$

Данные параметры могут быть применены и для оценки избирательной способности реализуе-

мого метода измерения, используемых режимов работы устройств, для сравнительной оценки их метрологических характеристик.

Известно, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) колебательного контура характеризуется наличием частот, при которых достигаются максимумы амплитуд колебаний на конденсаторе, резисторе и индуктивности (рис. 1).

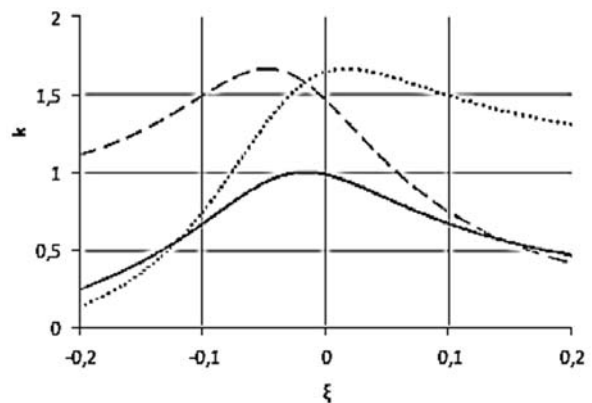


Рис. 1. АЧХ низкочастотного контура для напряжения на конденсаторе (---), на резисторе (___), на индуктивности (...)

В связи с этим чувствительность (1) и эффективность (2) измерительного процесса является функцией частоты колебаний в контуре. На рисунке 2 приведены частотные зависимости чувствительности для различных вариантов исполнения ИП с амплитудным выходом.

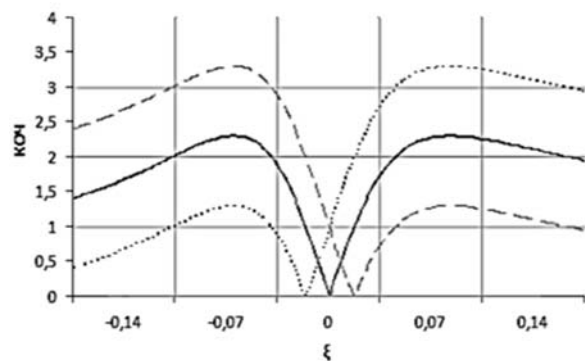


Рис. 2. Влияние рабочей частоты на чувствительность ИП при использовании в качестве выходного сигнала напряжения на конденсаторе (---), на резисторе (___) и на индуктивности (...)

Чувствительность датчика зависит также от того, какой параметр ИП является модулируемым (рис. 3).

Как видно из приведенных графиков, существуют определенные частоты колебаний, при которых одновременно могут обеспечиваться режимы вы-

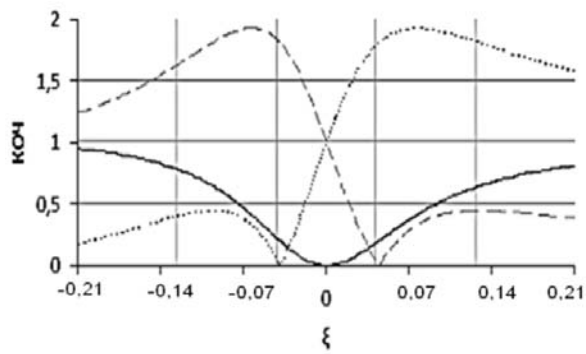


Рис. 3. Частотные зависимости чувствительности измерения емкости (...), активного сопротивления (—), индуктивности (---) схемы ИП

сокой чувствительности к изменению одних параметров колебательной системы датчика и низкой чувствительности — к изменению других ее параметров. На основании этого можно сделать вывод о том, что, оптимизируя конструкцию и режим работы ИП, можно обеспечить высокую чувствительность и эффективность (избирательность) измерительного процесса. На рисунке 4 приведены графики, из которых следует, что высокая эффективность измерения емкости конденсатора достигается при использовании в качестве выходного сигнала датчика напряжения на индуктивности, а измерение индуктивности — по напряжению на конденсаторе эквивалентной схемы ИП.

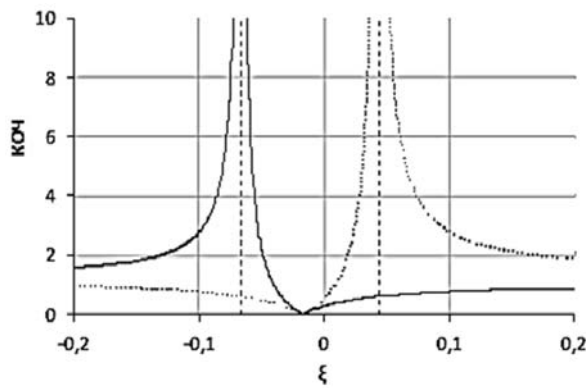


Рис. 4. Частотные зависимости эффективности измерения емкости по напряжению на индуктивности (сплошная линия) и измерения индуктивности по напряжению на конденсаторе (пунктирная линия) схемы ИП

Необходимо отметить, что применение такого подхода к повышению эффективности измерительного процесса практически трудно реализовать. Дело в том, что использование низкодобротных контуров обуславливает снижение чувствительности измерительного процесса, при этом трудно обеспечивать стабильность рабочей ИП. При повышении доброт-

ности колебательной системы ИП частоты экстремумов чувствительности настолько сближаются, что также затрудняет практическую реализацию данного способа. Одним из вариантов решения проблемы одновременного повышения чувствительности и обеспечения избирательной способности ИП может служить создание измерительных устройств, основанных на использовании взаимосвязанных колебаний высокодобротных осцилляторов, в качестве которых могут быть использованы, например, электрические колебательные контуры, электромеханические колебательные системы. Как показали проведенные исследования [6], рациональное использование связанных колебаний в пьезорезонансных структурах позволяет создавать на их основе высокочувствительные измерительные устройства с расширенными функциональными возможностями. Оптимизируя конструкцию и режимы работы таких устройств, можно существенно повысить их чувствительность и избирательную способность.

Как известно из теории колебаний, при сильной связи между взаимодействующими осцилляторами АЧХ системы с двумя степенями свободы имеют двугорбый вид, обусловленный наличием нормальных частот синхронизации синфазных и противофазных колебаний осцилляторов (рис. 5).

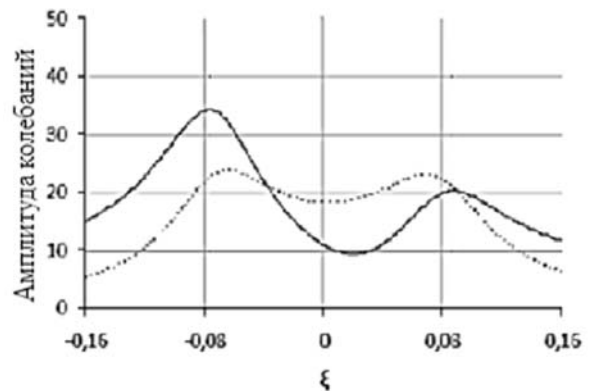


Рис. 5. АЧХ МСК ИП с двумя степенями свободы

На рисунках 5 и 6 приведены графики частотной зависимости чувствительности и эффективности измерения параметров ИП такого типа при использовании в качестве выходного сигнала датчика напряжения на конденсаторе ведущего (возбуждаемого) осциллятора.

Из приведенных графиков следует, что частотные зависимости чувствительности измерения параметров взаимосвязанных осцилляторов могут существенно отличаться. АЧХ ИП может содержать частоты связанных колебаний осцилляторов, при которых достигаются максимумы и минимумы чувствительности к изменению параметров системы. Это позволяет сделать

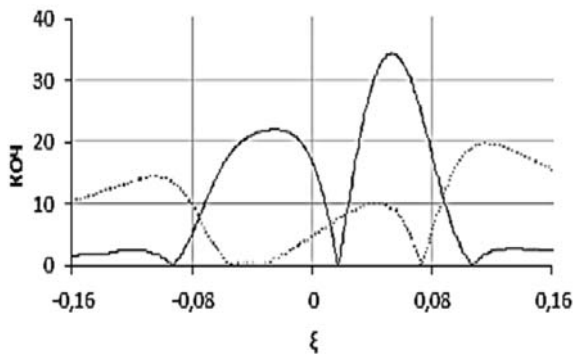


Рис. 6. Частотные зависимости чувствительности измерения индуктивности (сплошная линия) и емкости (пунктирная линия) осциллятора

вывод о том, что возбуждение колебаний на соответствующих частотах может обеспечивать высокую чувствительность и эффективность (избирательность) измерения определенных параметров ЭЭСЗ ИП (рис. 7).

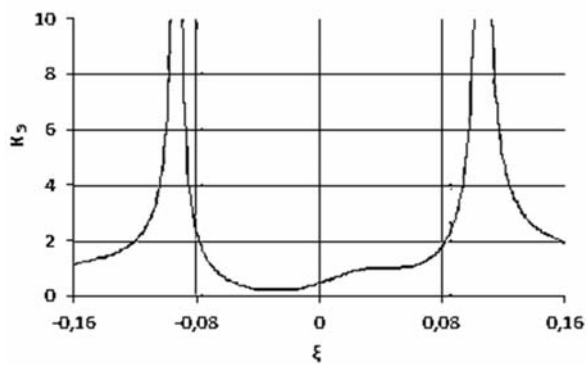


Рис. 7. Частотные зависимости эффективности измерения индуктивности при влияющем изменении емкости ведомого осциллятора

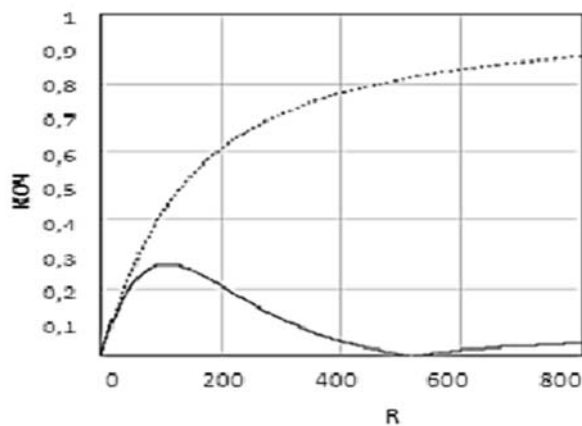


Рис. 8. Чувствительность измерения активного сопротивления ведомого осциллятора

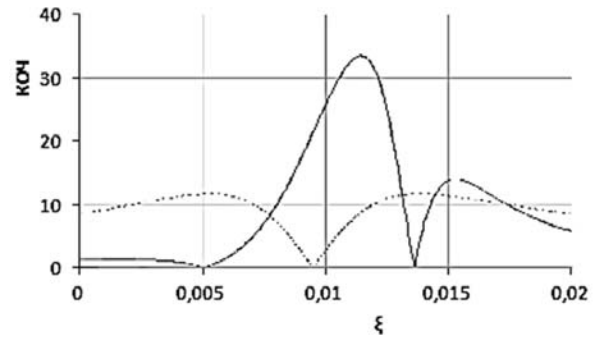


Рис. 9. Чувствительность измерения индуктивности ведомого осциллятора

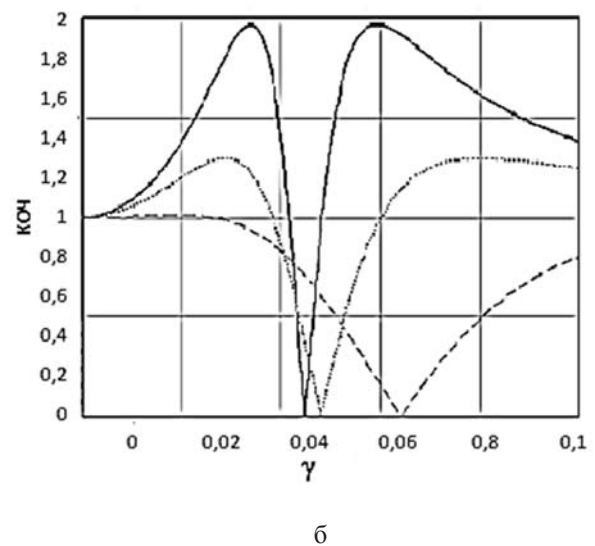
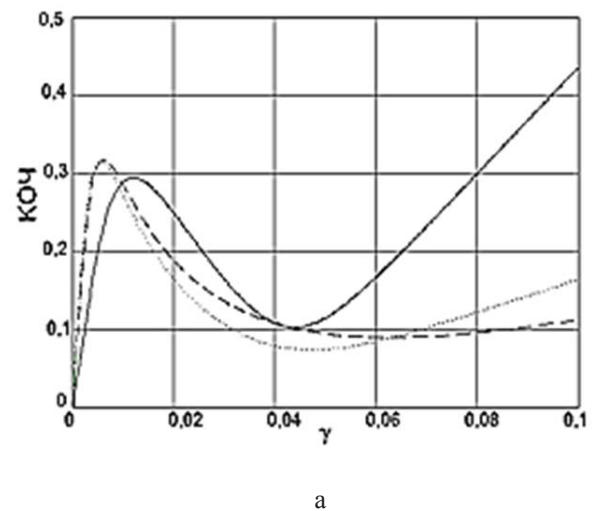


Рис. 10. Влияние уровня связи на чувствительность измерения при высокой (—), критической (---) и низкой (...) добротности осцилляторов возбуждаемого (а) и ведомого (б) осцилляторов

В общем случае модулируемыми могут являться параметры осцилляторов и элемента связи между ними. На рисунках 8 и 9 приведены графики чувствительности МСК ИП в функции измеряемых параметров при использовании в качестве выходного сигнала датчика напряжения на конденсаторе ведущего (сплошная линия) и ведомого (пунктирная линия) осцилляторов.

Графики, представленные на рисунке 10, отражают характер зависимости чувствительности и избирательной способности МСК ИП от величины добротности осцилляторов и уровня связи между ними.

Из приведенных графиков следует, что в окрестностях критических значений коэффициента связи существенно изменяется чувствительность измерений параметров взаимодействующих контуров.

На основании проведенных исследований были разработаны макеты и опытные образцы датчиков неэлектрических величин, физико-механических свойств материалов, основанные на использовании связанных колебаний составных пьезотрансформаторов [6].

Библиографический список

1. Богуш М.В. Пьезоэлектрическое приборостроение : сборник в 3 т. — Ростов н/Д, 2006.
2. Бадмаев Б.Б., Бальжинов С.А., Дамдинов Б.Б., Дембелова Т.С. Низкочастотная сдвиговая упругость жидкостей // Акустический журнал. — 2010. — Т. 56, № 5.
3. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. — М., 2006.
4. Богуш М.В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей. — М., 2014.
5. Шарапов В.М., Сотула Ж. Пьезоэлектрические преобразователи. Новые технологии проектирования // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2012. — № 5.
6. Седалищев В.Н. Пьезотрансформаторные измерительные преобразователи : монография. — Барнаул, 2015.