

УДК: 681.586.773

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

В.Н. Седалищев, М.Ю. Ларионов, А.В. Балыков, Г.М Горбова

Статья посвящена разработке принципов построения многоэлементных пьезорезонансных датчиков, основанных на модуляции связанных колебаний в сложных динамических системах. Рассмотрены особенности функционирования измерительных устройств данного типа.

Ключевые слова: Ключевые слова: составной пьезорезонатор, связанные колебания, многоэлементный первичный измерительный преобразователь

Введение

В основу разработки многоэлементных измерительных преобразователей (МЭ ИП) на основе взаимосвязанных пьезорезонаторов положена идея использования нелинейных процессов в сложных динамических системах. Измерительных устройств такого типа обладают особыми свойствами, позволяющими не только получать первичную измерительную информацию, но и осуществлять ее предварительную обработку.

Цель работы

Исследование динамических процессов в колебательных системах с конечным числом степеней свободы, оценка возможности их практического использования для целей измерения, передачи и обработки измерительной информации.

В отличие от линейных принципов формирования и обработки измерительной информации в таких устройствах реализуется принцип параллельной обработки измерительной информации, причем это происходит в условиях максимального приближения к объекту измерения.

Как показали результаты исследований и практической реализации разработанных устройств, использование различных режимов связанных колебаний в многоосцилляторных ансамблях позволяет создавать на их основе средства измерений, имеющие расширенные функциональные возможности, улучшенные метрологические и эксплуатационные характеристики.

Конструктивно многоэлементные датчики образуют единую колебательную систему, состоящую из взаимодействующих между собой пьезорезонаторов, вибраторов и линий акустической связи между ними. Количество пьезорезонаторов и вибраторов, используемых в конструкциях многоэлементных датчи-

ков, определяется их назначением (рисунок 1). Например, увеличение числа вибраторов, выполняющих роль чувствительных элементов датчика, обусловлено необходимостью создания многоточечных пространственно распределенных измерительных систем. В свою очередь, увеличение числа автогенераторов (активных элементов колебательной системы датчика) может быть продиктовано необходимостью расширения их функциональных возможностей.

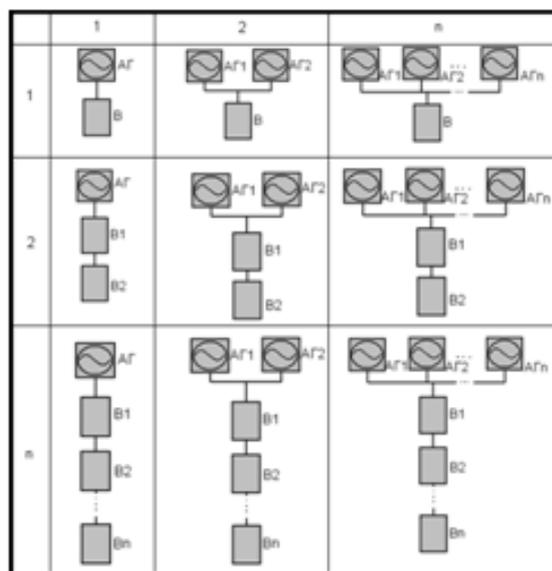


Рисунок 1 - Разновидности конструктивного исполнения МЭ ИП: АГ – автогенератор, В – вибратор

Описание модели

В общем случае колебательная система МЭ ИП представляет собой ансамбль взаимодействующих осцилляторов. На рисунке 2 представлена одна из базовых моделей МЭ ИП в виде цепочки осцилляторов. При такой

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

структуре колебательной системы каждый из осцилляторов связан только с двумя соседними (за исключением двух крайних).

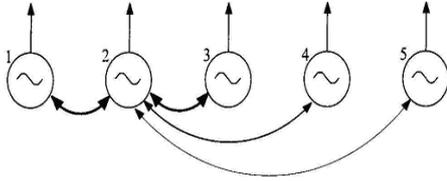


Рисунок 2 - Схема цепочки взаимодействующих осцилляторов

В теории колебаний [2] рассматривается механический аналог такой многоэлементной колебательной системы, состоящей из $(N+2)$ инерционно связанных шаров [2]. Уравнение движения для n -ой массы может быть представлено в виде дифференциального уравнения [2]:

$$m\ddot{x}_n + \dot{x}_n + 2kx_n - (x_{n-1} + x_{n+1}) = 0 \quad (1)$$

Масса каждого шара – m , жесткость пружины – k . Такое уравнение имеет решение:

$$\omega^2 = \frac{4k}{m} \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

Если оба конца цепи находятся в положении равновесия, то получим следующие соотношения:

$$x_0 = 0, \quad x_{N+1} = 0, \quad \sin \alpha(N+1) = 0,$$

или $\alpha_j = \frac{\pi j}{N+1}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (3)$

Спектр собственных частот такой системы в общем виде определяются выражением:

$$\omega_j = 2\sqrt{\frac{k}{m}} \sin \frac{\pi j}{2(N+1)} \quad (4)$$

При слабой связанности в системе отдельные осцилляторы могут находиться в противофазе друг относительно друга. При повышении связанности в системе они начнут группироваться в синфазно колеблющиеся группы или кластеры, которые, в свою очередь, уже между собой могут находиться в противофазе. Поэтому суммарный набег фазы к концу цепочки будет увеличиваться на угол, кратный числу π .

В случае сильной связанности между колеблющимися элементами цепочки минимальный сдвиг фаз между концевыми осцил-

ляторами может достигнуть π , а между любыми двумя точками спектра $\frac{\pi}{(N+1)}$.

Как известно, из общей теории колебаний [2], картина колебаний в таких системах принимает вид стоячих волн. Общее движение системы может быть описано как суперпозиция ее мод. Амплитуды и фазовые константы определяются из начальных условий. Длина такой стоячей волны это расстояние вдоль системы между двумя осцилляторами, которые колеблются в одинаковой фазе.

Для j -го колебания можно записать:

$$\alpha_j \lambda_j = 2\pi d \quad (5)$$

где d – расстояние между соседними осцилляторами, α_j – набег фазы, определяемый формулой (3), λ_j – длина волны j -го колебания.

Этот параметр для колебаний в пространстве имеет такой же смысл, что и период для колебаний во времени. Длина всей цепочки равна $(N+1)d$. По длине системы должно укладываться целое число полувольт, поэтому условие стоячей волны в системе имеет вид:

$$\frac{\lambda_j j}{2} = (N+1)d \quad (6)$$

Вводя волновое число k , получим выражение для суммарного набег фаз в системе:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \alpha_j = \frac{2\pi d}{\lambda_j} = k_j d \quad (7)$$

Таким же образом, используя понятие стоячих волн можно представить в функции нормальных частот синхронизации (НЧС) волнообразный характер распределения амплитуд колебаний вдоль цепочки взаимодействующих осцилляторов. Длина такой цепочки в частотном диапазоне будет определяться количеством полувольт, состоящих из групп синфазно синхронизированных осцилляторов. Разность фаз между группами осцилляторов с синхронизированными колебаниями будет составлять 180 градусов, то есть группы синхронизированных осцилляторов между собой будут находиться в противофазе. Это приведет к тому, что в частотном диапазоне ансамбль синхронизированных осцилляторов будет представлять собой периодически чередующиеся группы с противофазной синхронизацией.

На рисунке 3 приведены комбинации распределения векторов связанных колеба-

РАЗДЕЛ I. ТРУДЫ УЧЕНЫХ АЛТАЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ний отдельных осцилляторов или их групп, совершающих колебания на одной из НЧС системы. Число НЧС системы соответствует числу осцилляторов в цепочке. При числе взаимодействующих осцилляторов $N=2$ на первой НЧС колебания происходят в фазе, а на второй нормальной частоте – в противофазе, при этом суммарный набег фазы в цепочке составляет: $\sum \alpha_i = \pi$. Если последовательно соединить три осциллятора ($N=3$), то такая система будет иметь уже три НЧС и суммарный набег фаз по цепочке составит $\sum \alpha_i = 2\pi$ и т.д.

Результаты имитационного моделирования

С увеличением числа взаимодействующих осцилляторов, возрастает число НЧС системы, пропорционально возрастает и суммарный набег фазы в цепочке осцилляторов. Увеличение коэффициента связи или уменьшение относительной расстройки частот между осцилляторами приводит к увеличению связанности в системе, что, в свою очередь, обусловит уменьшение набег фазы в цепочке и увеличение длины стоячей волны. Под волной связанных колебаний по длине цепочки в данном случае подразумевается синусоидальное распределение амплитуд связанных колебаний отдельных осцилляторов в функции НЧС системы.

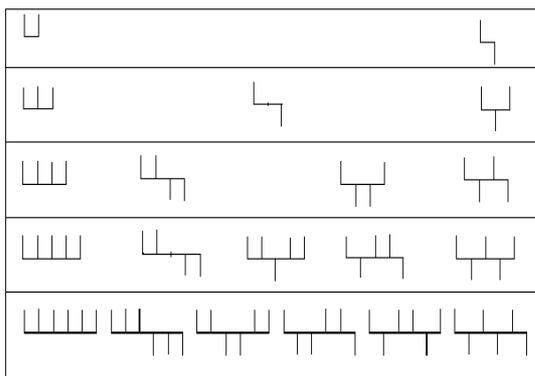


Рисунок 3 - Амплитудно-фазовые состояния ансамблей осцилляторов в цепочке на резонансных частотах колебаний в системе

Эквивалентные электрические схемы замещения таких МЭ ИП могут быть представлены в виде последовательно или параллельно соединенных электрических

колебательных контуров. Такой подход позволяет осуществить имитационное моделирование МЭ ИП с использованием широко распространенных пакетов прикладных программ (Microcap, Mat CAD и т.п.). С их помощью были исследованы синхронные, асинхронные и бифуркационные режимы связанных колебаний в МЭ ИП.

На рисунке 4 приведена спектральная характеристика колебательной системы, представляющей собой цепочку из 3-х осцилляторов.

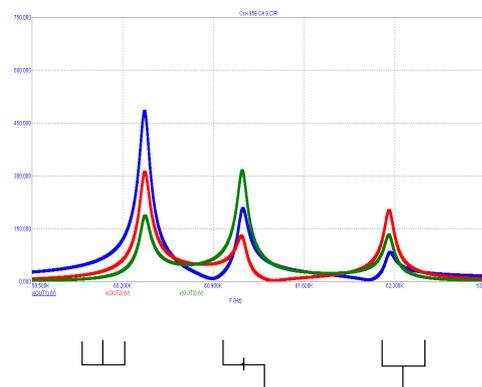


Рисунок 4 - АЧХ колебательной системы с тремя степенями свободы и векторные диаграммы связанных колебаний осцилляторов

Максимумы графиков АЧХ соответствуют резонансным режимам работы системы на НЧС системы. Этим частотам соответствуют определенные комбинации разности фаз колебаний осцилляторов. Изменение параметров отдельных элементов такой колебательной системы приводит к изменению режимов связанных колебаний осцилляторов, что обуславливает изменение амплитуд и разность фаз синхронизированных колебаний осцилляторов.

Основные математические соотношения

На первой НЧС системы колебания осцилляторов происходят в фазе, а их сумма равна алгебраической сумме. В МЭ ИП на базе пьезотрансформаторов удобно в качестве выходных сигналов использовать напряжения на генераторных обкладках пьезоэлементов. Тогда выходной сигнал датчика на первой НЧС системы может быть представлен в виде суммы выходных напряжений пьезотрансформаторов:

$$\sum(U_i)_1 = \sum(U_i)_1 \quad (8)$$

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

На второй НЧС ансамбль осцилляторов разделяется на два кластера, разность фаз между которыми составляет 180 градусов. Сумма амплитуд колебаний отдельных осцилляторов близка к нулю:

$$\sum(U_i)_2 \approx 0, \quad \sum(|U_i|)_2 \approx \sum(U_i)_1 \quad (9)$$

На третьей, четвертой и всех последующих НЧС системы сумма амплитуд колебаний осцилляторов с учетом фаз колебаний остается близкой к нулю, а по модулю приблизительно равна сумме амплитуд колебаний первой НЧС. Число групп синхронизированных осцилляторов соответствует номеру НЧС. При использовании пьезотрансформаторов в качестве взаимодействующих осцилляторов получим:

$$\sum(U_i)_j \approx 0, \quad \sum(|U_i|)_j \approx (U_\Sigma)_j \quad (10)$$

Как показал анализ результатов имитационного моделирования, установление конкретной НЧС системы происходит при выполнении определенных условий, при этом основную роль играет соотношение амплитуд колебаний отдельных осцилляторов.

На рисунке 5 представлены графики, отражающие бифуркационные режимы работы преобразователя с тремя степенями свободы. Соответствующее изменение добротностей колебательных контуров обусловило определенную последовательность переходов в такой системе с одной НЧС на другую, в частности, с третьей на вторую, а затем на первую НЧС системы.

К достоинствам МЭ ИП, основанных на использовании связанных колебаний пьезорезонаторов, можно отнести возможность создания на их основе:

- сенсорных самоорганизующихся систем, состоящих из большого числа распределенных в пространстве первичных преобразователей;
- высокочувствительных датчиков, применимых для эксплуатации в тяжелых условиях;
- датчиков для систем управления сложными быстропротекающими процессами.

Заключение

В результате проведенных исследований был разработан высокочувствительные пьезорезонансные датчики (усилий; давлений; вязкости жидких сред; уровня сыпучих материалов и т.п.) и приборы на их основе,

применимые для тяжелых условий эксплуатации.

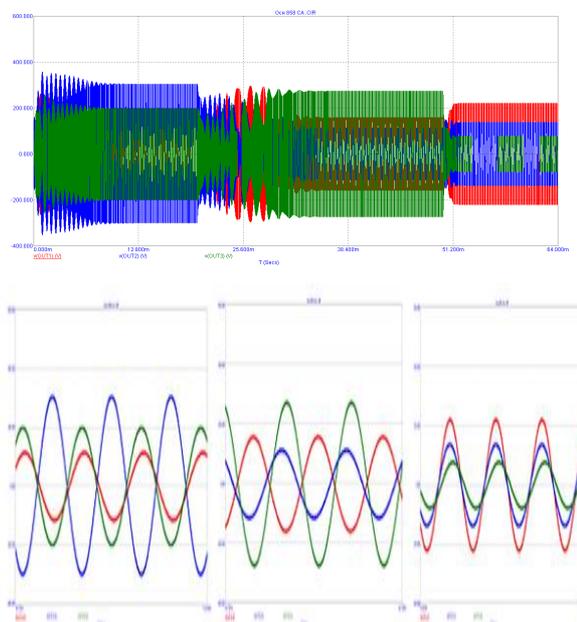


Рисунок 5 - Графики изменения амплитуд и разности фаз связанных колебаний трех последовательно соединенных осцилляторов при изменении их параметров (красный цвет - для первого осциллятора, синий - для второго, зеленый - для третьего)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

3. 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.
4. Трубецков, Д.И. Линейные колебания и волны./ Д.И. Трубецков, А.Г. Рожнёв.- Уч. Пособие. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001. 416 с.
5. Ларионов, М.Ю. Принципы построения и особенности функционирования многоэлементных измерительных преобразователей с использованием связанных колебаний пьезорезонаторов/ М.Ю.Ларионов, В.Н. Седалищев.- Ползуновский альманах №1 /Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. - с. 110-114.

Д.т.н., профессор **Седалищев В.Н.**, тел. 8-903-948-37-58, - sedalischew@mail.ru, к.т.н. Балыков А.В., аспирант **Ларионов М.Ю.**, д.т.н., доцент Горбова Г.М., Алтайский государственный технический университет.