ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

М. Ю. Ларионов, Т. В. Патрушева, Е. М. Патрушев, В. Н. Седалищев, А. В. Черкасов
Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова
г. Барнаул

В основу исследований по данной тематике положена идея использования нелинейных процессов в сложных динамических системах, в частности, процессов самоорганизации осцилляторных систем, с целью создания на их основе измерительных устройств с особыми свойствами, позволяющими осуществлять не только получение первичной измерительной информации, но и ее предварительную обработку, а также передачу по линиям связи.

Основной интерес проводимых исследований был сосредоточен на изучении динамических, колебательных процессов в колебательных системах с конечным числом степеней свободы и исследовании возможности их практического использования для целей измерения, передачи и обработки измерительной информации. При этом в качестве взаимодействующих осцилляторов использовались как генераторы гармонических колебаний (пьезорезонаторы) [1], электрические колебательные контуры [2], генераторы хаотических колебаний (генератор Чуа) [3]. На их основе были разработаны простейшие измерительные устройства, способные изменять свои характеристики в функции воздействующих на них физических величин, то есть быть способными приспосабливаться, адаптироваться к изменяющимся условиям работы. При большом многообразии входных воздействий такие сложные колебательные системы имеют некоторое число устойчивых состояний, характеризующихся определенными комбинациями выходных сигналов.

В отличие от существующих линейных принципов формирования и обработки измерительной информации в таких устройствах реализуется параллельный принцип выделения и предварительной обработки первичной измерительной информации, осуществляемой не схемно или программно, а непосредственно на физическом уровне, в условиях максимального приближения к объекту измерения. Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований, применение связанных колебаний в многоосцилляторных ансамблях позволяет создавать на их основе средства измерений с существенно улучшенными метрологическими характеристиками, упростить принцип формирования и обработки измерительной информации, повысить быстродействие, расширить функциональные возможности контрольно-измерительных устройств на их основе.

В простейшем случае колебательная система МЭ МСК ПРД, может быть представлена в виде определенного числа взаимодействующих между собой осцилляторов, соединенных между собой в виде цепочки или «каждый с каждым». Их эквивалентные электрические схемы замещения (ЭЭС3) могут быть представлены в виде электрических схем, состоящих из последовательно или параллельно соединенных колебательных контуров. Это позволяет осуществить имитационное моделирование режимов работы МЭ МСК ПРД с использованием пакетов прикладных программ.

Имитационное моделирование осуществлялось в основном с использованием широко распространенных пакетов прикладных программ, таких как Microcap, MatCAD. Были исследованы синхронные, асинхронные и бифуркационные режимы связанных колебаний в системах с конечным числом степеней свободы.

В данной работе отражены результаты исследования синхронных режимов связанных колебаний гармонических осцилляторов. На рисунке 1 приведена спектральная характеристика колебательной системы, представляющей собой цепочку из 3-х осцилляторов. Всплески на АЧХ обусловлены наличием нормальных частот связанных колебаний в системе, которым соответствуют определенные типы синхронизированных колебаний осцилляторов (синфазных или противофазных). Изменение параметров отдельных элементов такой колебательной системы приводит к изменению режимов связанных колебаний осцилляторов, что обусловливает в итоге

изменение амплитуд и разность фаз синхронизированных колебаний осцилляторов.

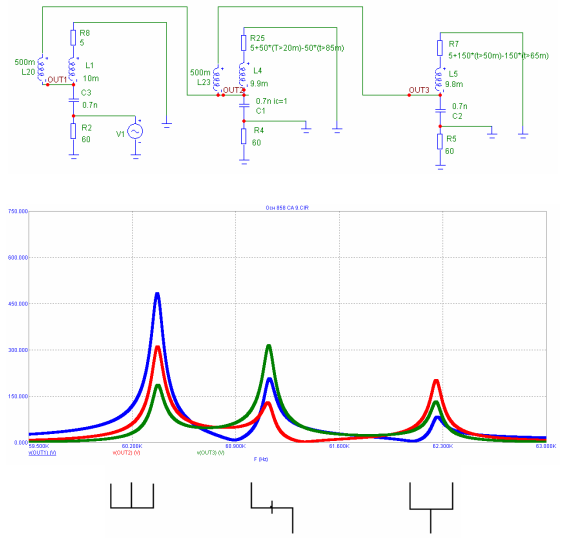

Рисунок 1 – АЧХ колебательной системы с тремя степенями свободы и векторные диаграммы связанных колебаний осцилляторов на нормальных частотах синхронизации системы

В результате проведенного имитационного моделирования динамики ансамблей сильно связанных колебаний пьезорезонаторов были установлены следующие закономерности:

1. На первой нормальной частоте синхронизации (НЧС) системы колебания осцилляторов происходят в фазе, а их суммарная амплитуда (например, сумма выходных напряжений пьезоэлектрических трансформаторов) достигает максимума.

$$\sum(U_i)_1 = \sum\left(\left|U_i\right|\right)_1$$

2. На второй НЧС ансамбль осцилляторов разделяется на два кластера, разность фаз между которыми составляет 180 градусов, сумма абсолютных значений напряжений близка к нулю, а по модулю соответствует сумме амплитуд колебаний на первой НЧС.

$$\sum(U_i)_2 \approx 0\ ,\ \sum(\left|U_i\right|)_2 \approx \sum(U_i)_1$$

3. На третьей, четвертой и других НЧС суммарное напряжение по абсолютной величине также остается близким к нулю, а по модулю приблизительно равным сумме напряжений на первой НЧС. Число групп синхронизированных осцилляторов соответствует номеру НЧС.

$$\sum(U_i)_j \approx 0\ ,\ \sum(\left|U_i\right|)_j \approx (U_\Sigma)_j\ .$$

Как показал анализ результатов проведенных исследований, установление одной из частот синхронизации системы происходит по определенным правилам, при этом играют роль соотношение амплитуд и частот отдельных осцилляторов, значения уровня связи между ними. Например, преобладание амплитуды колебаний одного осциллятора над другими является одним из основных факторов, определяющих перескок частоты синхронизированных колебаний на одну из ее НЧС, при которой ведущим осциллятором будет являться осциллятор с максимальной амплитудой.

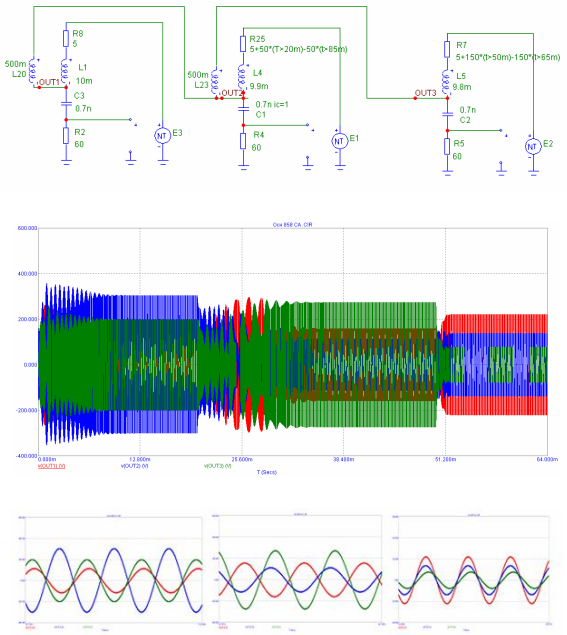

Рисунок 2 – Графики изменения амплитуд связанных колебаний трех последовательно соединенных осцилляторов при изменении их параметров (красный цвет - для первого осциллятора, синий – для второго, зеленый – для третьего)

На рисунке 2 представлены режимы перехода колебаний с одной НЧС на другую в результате изменения параметров взаимосвязанных осцилляторов.

В общем случае могут быть применены три подхода к обработки сигналов в таких МЭ МСК ПРД, основанных на измерении НЧС, определении вида комбинации векторов выходных напряжений пьезорезонаторов, а также на измерении амплитуд связанных колебаний пьезорезонаторов. При этом измерение амплитуды колебаний только одного из взаимосвязанных осцилляторов будет нести

информацию о состоянии всей колебательной системы многоэлементного датчика.

При разработке измерительных устройств данного типа необходимо иметь в виду, что длительность переходных процессов в таких устройствах зависить от числа осцилляторов в ансамбле, от их добротности и коэффициента связи между ними. Например, чем больше степень связанности в системе, тем быстрее протекают в ней переходные процессы. На характер переходных процессов в системе влияет также и длительность возмущающего воздействия: чем дольше длится внешнее воздействие, тем быстрее наступает переход системы в новое устойчивое состояние.

Необходимо также учитывать влияние шума на переходные и бифуркационные процессы, протекающие в таких сложных динамических системах. Как показали результаты экспериментальных исследований и имитационного моделирования, зашумление связанных колебаний осцилляторов сигналами генераторов более высоких частот приводит к изменению скорости протекания переходных процессов в системе. Увеличение уровня шума может приводить как к возрастанию, так и к убыванию продолжительности процесса перехода системы из одного режима связанных колебаний в другой. При этом играют роль амплитудные и частотные характеристики сигналов зашумления.

Было установлено, что режим противофазных колебаний в системе существенно менее чувствителен к изменению коэффициента связи, по сравнению с режимом синфазных колебаний осцилляторов. В режиме синфазных колебаний увеличение коэффициента связанности приводит к снижению чувствительности преобразователя, а при высоких значениях коэффициента связанности может даже произойти переключение в режим противофазных колебаний.

На основе МЭ МСК ПРД могут быть разработаны функциональные преобразователи сигналов. При изменении параметров колебательной системы будет происходить изменение параметров полинома, отражающего реализуемую системой функцию измерительного преобразования. Изменение параметров системы может привести к перескоку на другую рабочую частоту с новой комбинацией векторов и коэффициентов полинома. Функция измерительного преобразования такого устройства сугубо нелинейная, параметры зависимости являются функциями состояния системы. Если изменяется добротность отдельных осцилляторов, то происходит почти пропорциональное изменение коэффициентов полинома. Если изменяются индуктивность или емкость осцилляторов или элементов связи, то при этом изменяются собственные частоты осцилляторов, а это может приводить к изменению их порядкового номера в цепочке, при этом изменяется чувствительность системы. Характер изменения параметров полинома поясняется фазовой диаграммой цепочки (ФДЦ).

В результате проведенных исследований были определены значения коэффициентов полиномов, отражающих функциональную зависимость приращения выходных напряжений пьезотрансформаторов МЭ МСК ПРД. Например, ниже приведены данные о значениях коэффициентов полиномов для системы с тремя степенями свободы, отражающие влияние на приращение выходных напряжений пьезотрансфориаторов изменения их эквивалентных емкостей, возникающих, например, в результате изменения упругих свойств последовательно соединенных вибраторов под действием изменения рабочей температуры, изменения контактной жесткости вибраторов и т.п.

При возбуждении осциллятора №1:

$$(\omega_1)\quad \Delta U_1 \cdot \kappa_{11} = 2{,}03 \cdot \Delta C_1 - 2{,}17 \cdot \Delta C_2 - 1{,}83 \cdot \Delta C_3$$

$$(\omega_2)\quad \Delta U_1 \cdot \kappa_{21} = -4{,}28 \cdot \Delta C_1 + 3{,}05 \cdot \Delta C_2 + 1{,}2 \cdot \Delta C_3$$

$$(\omega_3)\quad \Delta U_1 \cdot \kappa_{31} = -2{,}58 \cdot \Delta C_1 + 1{,}0 \cdot \Delta C_2 + 1{,}32 \cdot \Delta C_3$$

При возбуждении осциллятора №2:

$$(\omega_1)\quad \Delta U_2 \cdot \kappa_{12} = 2{,}71 \cdot \Delta C_1 + 9{,}43 \cdot \Delta C_2 + 7{,}0 \cdot \Delta C_3$$

$$(\omega_2)\quad \Delta U_2 \cdot \kappa_{22} = 4{,}6 \cdot \Delta C_1 + 0{,}9 \cdot \Delta C_2 - 0{,}63 \cdot \Delta C_3$$

$$(\omega_3)\quad \Delta U_2 \cdot \kappa_{32} = -0{,}04 \cdot \Delta C_1 - 0{,}02 \cdot \Delta C_2 + 0{,}12 \cdot \Delta C_3$$

При возбуждении осциллятора №3:

$$(\omega_1)\quad \Delta U_3 \cdot \kappa_{13} = -4{,}76 \cdot \Delta C_1 + 0{,}4 \cdot \Delta C_2 + 5{,}1 \cdot \Delta C_3$$

$$(\omega_2)\quad \Delta U_3 \cdot \kappa_{23} = 1{,}28 \cdot \Delta C_1 - 1{,}46 \cdot \Delta C_2 - 1{,}85 \cdot \Delta C_3$$

$$(\omega_3)\quad \Delta U_3 \cdot \kappa_{33} = 0{,}5 \cdot \Delta C_1 + 3{,}4 \cdot \Delta C_2 4{,}04 \cdot \Delta C_3$$

где k_{ij} – коэффициент пропорциональности.

Как следует из полученных зависимостей в результате перераспределения колебательной энергии между взаимодействующими осцилляторами на определенных частотах выходное напряжение датчика может возрастать, а на других убывать, или оставаться практически неизменным.

Важным обстоятельством является то, что параметры полиномов изменяются с изменением НЧС по гармоническому закону. Это позволяет осуществлять их предвари-

тельный расчет, но при этом необходимо иметь в виду, что изменение параметров вибраторов в функции измеряемого воздействия приводит к изменению и коэффициентов полиномов. Поэтому выходное напряжение такого МЭ МСК ПРД будет сложным образом изменяться в функции измеряемого воздействия. На стадии проектирования датчика рассчитать с высокой точностью параметры такой функциональной зависимости не представляется возможным. Поэтому разработка конкретной модели такого измерительного устройства должна включать в себя стадии имитационного моделирования и градуировки.

При глобальной (параллельной) схеме соединения системы порядковый номер отдельного осциллятора в виртуальной цепочке определяется значением его собственной резонансной частоты. Отличительной особенностью такой схемы соединения является то, что коэффициенты связи между отдельными осцилляторами могут быть одинаковыми. Поэтому при воздействии на параметры осцилляторов их очередность в виртуальной цепочке может существенно изменяться, что соответствующим образом отразится на параметрах градуировочной характеристики датчика. Очевидно, что параллельное соединение осцилляторов удобнее использовать для проведения многоточечных измерений в ограниченном пространстве, а последовательное соединение осцилляторов – для пространственно протяженных объектов.

Так как изменение упругих свойств отдельных осцилляторов может приводить к перераспределению энергии между осцилляторами и, соответственно, к изменению их выходного напряжения, то это может быть использовано для создания датчиков дифференциального типа, обеспечивающих расширение диапазона рабочей температуры и температурную стабильность измерительного преобразователя.

Другим важным достоинством МЭ МСК ПРД является то, что в отличие от ПРД традиционного типа, для их создания могут использоваться пьезокерамические материалы, характеризующиеся низкой стабильностью параметров. Применение соответствующих режимов связанных колебаний в ансамблях взаимодействующих осцилляторов приводит к перераспределению колебательной энергии между отдельными осцилляторами таким образом, что выходной сигнал датчика может не зависеть от изменения характеристик пьезоматериала под воздействием различных влияющих факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седалищев В.Н. Измерительные устройства, основанные на реализации режимов связанных колебаний в пьезорезонансных датчиковых структурах // Ползуновский вестник. – 2006. - №2. – С. 264 - 270.
2. Назаров А.С., Седалищев В.Н. Высокочувствительный емкостной датчик уровня с использованием взаимосвязанных колебаний осцилляторов // Ползуновский альманах. – 2010. - №2. – С. 96 .
3. Патрушева Т.В., Патрушев Е.М. Исследование автогенераторного измерительного преобразователяна основе цепи Чуа в символической динамике // Ползуновский альманах. – 2010. - № 2. – С.38-41.