

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

М. Ю. Ларионов, В. Н. Седалищев

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

Теоретической базой нового направления в приборостроении, основанного на разработке многоэлементных первичных измерительных преобразователей с модуляцией в функции измеряемого воздействия связанных колебаний пьезорезонаторов (МЭ МСК ПРД), являются успехи в развитии нелинейной динамики. Использование сложных нелинейных динамических систем для создания устройств получения и обработки измерительной информации открывает новые возможности для метрологии и технических измерений. Исследования, проектирование, прогноз поведения таких сложных динамических систем опираются, с одной стороны, на использование компьютерных технологий, а с другой – на построение иерархии физических и математических моделей. На верхнем уровне в такой иерархии находятся сложные физические модели с широкой областью применимости, анализ которых требует достаточно больших вычислительных процедур. Модели более низкого уровня проще, но могут быть применимы только в более узких рамках. Их достоинством является универсальность, так как при исследовании множества различных нелинейных систем возникают одни и те же модели этого уровня. Изучение таких систем позволяет ввести новые концепции, понятия, методы исследования.

Как известно из теории колебаний, в системах с большим числом степеней свободы могут устанавливаться сложные режимы взаимодействий между отдельными осцилляторами. Такие колебательные системы характеризуются наличием гистерезиса, требующего дополнительных затрат энергии для перевода системы из одного устойчивого состояния в другое, что позволит повысить их устойчивость при быстропотекающих динамических процессах. Изменяя параметры осцилляторов, их добротность и резонансные частоты, можно реализовать определенный алгоритм реакции сложной колебательной системы на изменение входных воздействий. Таким образом, на основе ансамблей взаи-

модействующих осцилляторов могут быть реализованы не только измерительные, но и функциональные преобразователи.

В связи с тем, что процессы синхронизации, бифуркации в сложных нелинейных колебательных системах со многими степенями свободы могут иметь недетерминированный, стохастический характер, представляет интерес исследование возможности создания на их основе функциональных устройств с нечеткой логикой. К их достоинствам можно отнести схемную и конструктивную простоту, высокую чувствительность, надежность в работе, устойчивость к воздействию дестабилизирующих факторов. Как показали теоретические и экспериментальные исследования, максимальная чувствительность таких устройств достигается при реализации бифуркационных режимов связанных колебаний осцилляторов.

К настоящему времени одним из перспективных направлений в данной области является разработка измерительных и функциональных преобразователей, контроллеров с нечеткой логикой на основе взаимосвязанных осцилляторов и даже осцилляторных нейроноподобных измерительных устройств на основе использования связанных колебаний в пьезорезонансных структурах. Особенностью таких многоосцилляторных преобразователей является то, что в них большое разнообразие выполняемых функций реализуется не за счет использования дополнительных электронных узлов обработки измерительной информации, а непосредственно на физическом уровне в результате перераспределения колебательной энергии между взаимодействующими осцилляторами, в условиях максимального приближения к объекту измерения. Это позволяет существенно повысить точность и разрешающую способность измерительных устройств, расширить их функциональные возможности, обеспечить параллельный принцип первичной обработки большого объема измерительной информации.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

Конструктивно МЭ МСК ПРД представляют собой единую колебательную систему, состоящую из определенного числа взаимодействующих между собой пьезорезонаторов и вибраторов (рисунок 1).

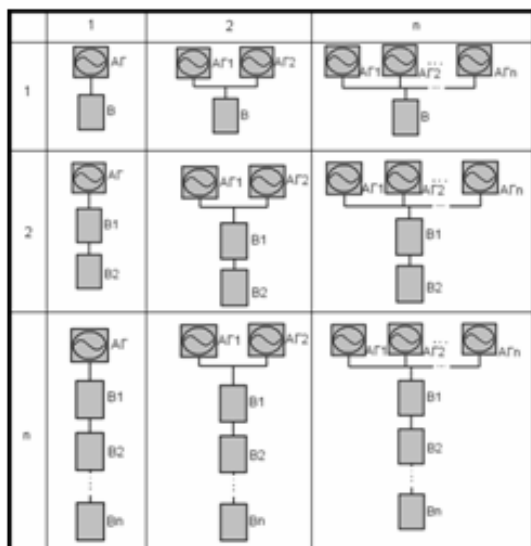


Рисунок 1 – Разновидности конструктивного исполнения МЭ МСК ПРД. АГ – автогенератор на основе пьезорезонатора, В – вибратор

Чувствительные элементы таких многоэлементных датчиков могут быть распределены в линию, в плоскости, в объеме. Для этой цели могут использоваться последовательные, параллельные и смешанные схемы соединения осцилляторов.

На рисунке 2 представлена одна из базовых моделей многоэлементных датчиков в виде цепочки осцилляторов. При таком виде соединения осцилляторов структура ансамбля упорядочена таким образом, что каждый из осцилляторов связан только с двумя соседями (за исключением двух крайних).

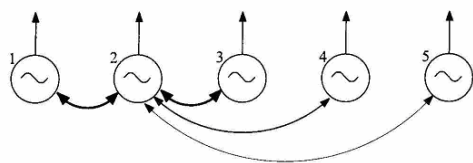


Рисунок 2 – Схема цепочки взаимодействующих осцилляторов

В общем случае в качестве осцилляторов могут использоваться радиотехнические цепочки, электронные приборы СВЧ диапазона и т.п. В теории колебаний рассматривает-

ся механическая модель такой многоэлементной колебательной системы в виде схемы, изображенной на рис. 3а, состоящая из $(N+2)$ инерционно связанных шаров [1].

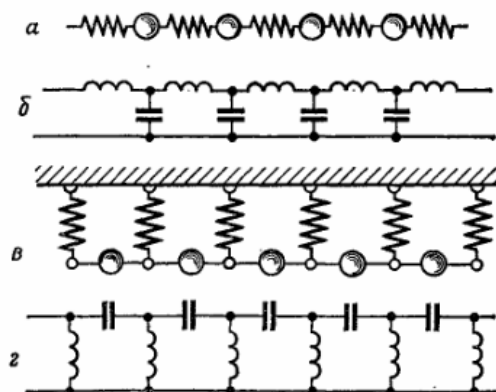


Рисунок 3 – Модель механической многоэлементной колебательной системы

Масса каждого шара – m и жесткость пружины – k . Уравнение движения для n -ой массы может быть представлено в виде дифференциального уравнения:

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

Такое уравнение имеет следующее 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 следующим выражением:

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

При слабой связанности в колебательной системе отдельные осцилляторы в цепочке 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, между собой будут оставаться в противофазе. Поэтому суммарный набег фазы к концу цепочки будет уменьшаться на угол, кратный числу π . При достаточно сильной связанности между ко-

леблющимися элементами цепочки сдвиг фаз между концевыми осцилляторами может достигнуть π , а между любыми двумя точками спектра $\frac{\pi}{(N+1)}$. Распределение собственных

частот вдоль оси ω будет неоднородным. Увеличивая количество осцилляторов N , плотность проекций точек, изображающих собственные частоты, на эту ось будет возрастать быстрее около крайних точек. Если $N \rightarrow \infty$, а движущиеся элементы находятся в ограниченном объеме, то расстояние между соседними элементами стремится к нулю. Система ведет себя так, как если бы она была непрерывной, т.е. движение соседних элементов почти одинаково. Если увеличивать количество масс и пружин, а их самих уменьшать, то рассматриваемая цепь переходит в струну. Картина колебаний принимает вид стоячих волн. Стоячие волны являются нормальными модами непрерывных систем. Непрерывная система имеет бесконечное число степеней свободы и соответственно бесконечным числом мод. Общее движение системы может быть описано как суперпозиция ее мод. Амплитуды и фазовые константы определяются из начальных условий. Длина стоячей волны – расстояние вдоль системы между двумя осцилляторами, которые колеблются в одинаковой фазе. Тогда 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 T 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 волнообразный характер распределения амплитуд колебаний вдоль цепочки взаимодействующих осцилляторов. Тогда «длина» такой це-

почки осцилляторов в частотном диапазоне будет определяться количеством полувольт, состоящих из групп синфазно синхронизированных осцилляторов. Разность фаз между такими группами осцилляторов с синхронизированными колебаниями будет составлять 180 градусов, то есть группы синхронизированных осцилляторов между собой будут находиться в противофазе. Это приведет к тому, в частотном диапазоне ансамбль синхронизированных осцилляторов будет представлять собой периодически чередующиеся группы с противофазной синхронизацией.

На рисунке 4 приведены комбинации распределения векторов связанных колебаний отдельных осцилляторов или групп их на нормальных частотах синхронизации системы. Число нормальных частот синхронизации соответствует числу осцилляторов в цепочке.

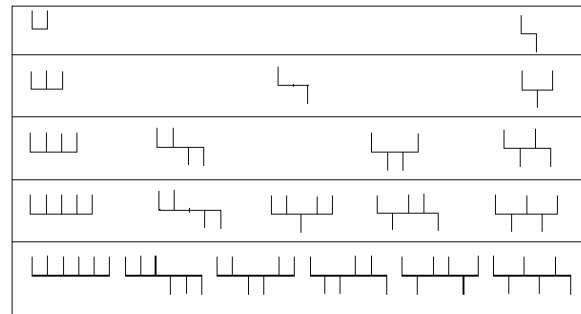


Рисунок 4 – Фазовые диаграммы цепочек осцилляторов при нормальных частотах синхронизации систем

При числе взаимодействующих осцилляторов $N=2$ на первой нормальной частоте колебания происходят в фазе, а на второй нормальной частоте – в противофазе, при этом суммарный набег фазы в цепочке составил: $\sum \alpha_i = \pi$

Если последовательно соединить три осциллятора $N=3$, то такая система будет иметь три нормальные частоты синхронизации и суммарный набег фаз по цепочке составит $\sum \alpha_i = 2\pi$ и т.д.

Как следует из приведенного примера, с увеличением числа взаимодействующих осцилляторов, возрастает число нормальных частот синхронизации системы, пропорционально возрастает и суммарный набег фазы в цепочке осцилляторов. Увеличение коэффициента связи между осцилляторами приводит к увеличению связанности в системе, а это, в свою очередь, определяет уменьшение

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

набега фазы в цепочке, приводит к уменьшению волнового числа, увеличивается длина волны по цепочке. При этом становится все более явно выраженной суперпозиция колебаний отдельных осцилляторов и групп осцилляторов. Под волной связанных колебаний по длине цепочки в данном случае подразумевается синусоидальное распределение амплитуд связанных колебаний отдельных осцилляторов в функции нормальной частоты синхронизации.

Энергия колебательной системы при изменении ее параметров (кроме добротности) при сильной связанности осцилляторов остается практически неизменной. При этом амплитуды колебаний отдельных осцилляторов в результате перераспределения энергии между ними изменятся таким образом, что суммарная амплитуда колебаний осцилляторов остается также практически постоянной величиной. При этом разность фаз связанных колебаний соответствует одной из возможных комбинаций (рисунок 4).

Сильно связанную колебательную систему можно представить в виде двух обобщенных синфазно или противофазно синхронизированных ансамблей осцилляторов. Для упрощенного анализа такой системы был предложен метод условных контуров [2], суть которого заключается в том, что колебательная система любой сложности может быть заменена эквивалентной системой с двумя степенями свободы. Такая система, в свою очередь преобразуется в систему, состоящую из двух контуров: высокочастотного (контур несущей частоты) и низкочастотного (контур модуляции колебаний несущей частоты). Для вычисления параметров эквивалентной схемы замещения таких условных контуров используются упрощенные аналитические зависимости, полученные с использованием статистических оценок обобщенных параметров колебательной системы [3]:

$$\begin{cases} \tilde{x} = \tilde{A}(t) \cdot \cos[\tilde{\omega}t - \varphi(t)] \\ \tilde{A}(t) = A_0 + \frac{\tilde{\gamma}\tilde{\omega}}{2\tilde{\Omega}} \cdot \tilde{B}(t) \sin \tilde{\Omega}t \\ \tilde{\Omega} = \Delta\tilde{\omega}\sqrt{1-\tilde{\lambda}^2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\tilde{\lambda} = \frac{\tilde{\gamma} \cdot \tilde{\omega} \cdot \tilde{\xi}}{\Delta\tilde{\omega}} = \frac{\tilde{\gamma} \cdot \Delta\tilde{A}}{\Delta\tilde{\omega} \cdot \tilde{A}};$$

$$\tilde{\omega} \approx \frac{\sum \omega_i}{n};$$

$$\Delta\tilde{\omega} = \sqrt{\frac{\sum (\omega_i - \tilde{\omega})^2}{n}};$$

$$\Delta\tilde{A} = \sqrt{\frac{\sum (A_i - \tilde{A})^2}{n}}, \quad (9)$$

где $\tilde{A}$, $(\tilde{B})$, $\Delta\tilde{A}$, $\tilde{\omega}$, $\tilde{\xi}$, $\tilde{\xi}$, $\tilde{\Omega}$, $\Delta\tilde{\omega}$, $\tilde{\gamma}$, $\tilde{\lambda}$ – усредненные значения амплитуды связанных колебаний, глубины ее модуляции; частоты синхронизированных колебаний, расстройки собственных частот парциальных контуров; относительной расстройки собственных частот контуров; относительной расстройки амплитуд колебаний в контурах; частоты биения колебаний в системе; коэффициентов связи между контурами, коэффициента взаимодействия между парциальными колебательными системами.

Применяя методы статистической обработки параметров отдельных осцилляторов (будем считать их разброс случайным процессом), можно произвести статистическую оценку эквивалентных параметров многоосцилляторной колебательной системы. Согласно методу условных контуров [3], такая колебательная система может быть заменена двумя условными контурами. Колебания в одном из них происходят с усредненной средневзвешенной частотой ($\tilde{\omega}$). Во втором контуре, отражающем степень разбаланса системы, при слабой связанности контуров осуществляется колебательный процесс с частотой, определяемой среднестатистической частотой расстройки системы, а при сильной связанности – апериодический колебательный процесс.

Применение для анализа связанных колебаний в сложных многоосцилляторных системах метода условных контуров, позволяет существенно упростить анализ динамических процессов в таких сложных системах, разработать упрощенную методику расчета и проектирования многоэлементных измерительных преобразователей. Например, анализ динамики колебательных процессов в системе любой сложности сводится к анализу процессов в ее условных эквивалентных контурах, что делает удобным применение метода условных контуров в инженерной практике. При этом колебания в системе осцилляторов любой сложности могут быть представлены в виде высокочастотных колебаний, промодулированных низкочастотной составляющей.

При возбуждении системы от одного источника энергии колебания совершаются на общей синхронизированной частоте, соответствующей частоте условного контура. При возбуждении контуров от отдельных генераторов в системе возможна реализация не

только синхронного, но и асинхронного режима, что соответствует режиму автоколебаний в разностном условном контуре.

Условный разностный контур отражает характер протекающих динамических процессов в сложной колебательной системе. Высококочувствительному режиму бифуркации связанных колебаний в сложной системе ($\tilde{\lambda} \approx 1$) соответствует режим аperiodический режим колебаний в дифференциальном условном колебательном контуре. Линейному режиму работы полностью синхронизированной колебательной системы ($\tilde{\lambda} \approx \sqrt{2}$) соответствует аperiodический процесс в таком условном контуре.

Высококочувствительный бифуркационный режим связанных колебаний в сложной динамической системе может быть использован для создания высококочувствительных устройств контроля. Для разработки измерительных устройств дифференциального типа, характеризующихся высокой линейностью процесса измерительного преобразования, лучше всего использовать синхронный режим взаимодействия осцилляторов в окрестностях значений $\tilde{\lambda} = \sqrt{2}$. Линейный режим измерительного преобразования может быть обеспечен и при отсутствии взаимодействий между отдельными осцилляторами, но практически реализовать данное условие в большинстве случаев является достаточно сложной технической задачей. Для этой цели используют дополнительные меры по обеспе-

чению их электромагнитной и акустической развязки.

Особый интерес вызывает возможность использования в сложных колебательных системах режима сильно связанных колебаний ($\tilde{\lambda} > \sqrt{2}$). Практическая реализация данного режима используется для удаления наиболее уязвимой части датчика из зоны сильного воздействия дестабилизирующих факторов. Это позволяет создавать высококочувствительные устройства контроля параметров технологических процессов, применимые для тяжелых условий эксплуатации измерительного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубецков Д.И., Рожнёв А.Г. Линейные колебания и волны. Уч. Пособие. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001. 416 с.
2. Седалищев В.Н., Хомутов О.И. Высококочувствительные пьезорезонансные датчики с использованием связанных колебаний для экстремальных условий эксплуатации. – Барнаул: АлтГТУ, 2006. 184 с.
3. Балыков А.В., Малых А.С., Назаров А.С., Седалищев В.Н., Сорокин С.Е., Тицнер А.О., Тятюхин А.А. Применение статистических методов линейного оценивания для определения обобщенных параметров осцилляторных нейроноподобных измерительных устройств // Ползуновский альманах. – 2008. - № 2. – С.33-37.