

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

MODELING OF SENSITIVE ELEMENTS FOR MANY-FUNCTIONAL

Москва, Московский университет потребительской кооперации
Moscow, Moscow university of consumers cooperation

Abstract. There have been considered questions of numerical modeling of sensitive piezoelectric elements for many-functional. There have been shown ways and possibilities of control of working vibration frequencies and providing of necessary intensity of their vibrations when by-vibrations decrease in required degree. It is noted that application of many-functional let at the same time to measure some of unelectric quantities and when one quantity is measuring, to decrease the influence of unstabilizing factors essentially, decreasing the mistake of measure.

Характерной особенностью современных измерений большинства неэлектрических величин является их предварительное преобразование в электрическую величину. В этом случае метрологические характеристики средств измерений в большей степени будут определяться данными преобразователями. Поэтому правильный выбор преобразователя в каждом конкретном случае является определяющим для удовлетворения требуемым метрологическим характеристикам средства измерения в целом. Существенное влияние при этом на точность измерения оказывают дестабилизирующие факторы. Для уменьшения их влияния в ряде случаев приходится прибегать к сложным техническим решениям, которые, к сожалению, не всегда приводят к желаемым результатам.

В докладе рассматриваются возможности уменьшения погрешности результата измерения благодаря использованию преобразователя, имеющего два или более информационных сигнала, которые проходят последующую микропроцессорную обработку. Такие возможности, например, заложены в многорезонансных свойствах пьезоэлектрических резонаторов. Многомодовый режим работы пьезоэлектрических резонаторов, под которым понимается целенаправленное одновременное возбуждение в резонаторе нескольких колебаний, привлекает все большее внимание специалистов, так как позволяет, в частности, существенно улучшить метрологические характеристики измерительных устройств, построенных на их основе.

Например, при одновременном воздействии на двухчастотный резонатор температуры и влажности среды информация об обоих воздействиях будет содержаться в каждой частоте, причем зависимости каждой частоты (как правило, нелинейные) от обеих измеряемых величин известны. После решения системы двух нелинейных уравнений с помощью современных средств ВТ, определяется температура и влажность. Причем погрешность определения каждой величины, связанная со взаимным влиянием на точность другой величины, уменьшается на один-два порядка! Подобным образом при использовании трехчастотных резонаторов можно исключить влияние двух дестабилизирующих факторов и т. д.

Основные сложности, возникающие при проектировании подобных чувствительных элементов, связаны с обеспечением заданного частотного расстояния между рабочими частотами, а также с обеспечением достаточной интенсивности их колебаний при требуемом ослаблении побочных резонансов. Разработка таких пьезоэлементов сдерживается как недостаточностью эффективных технических решений, так и слабой изученностью зависимостей тех резонансных колебаний, которые, благодаря определенной симметрии поляризационных характеристик, не возбуждаются в многочастотных резонаторах, имеющих, как правило, круглую или прямоугольную формы электродов. При проектировании же многочастотных чувствительных пьезоэлементов сведения о полном спектре их частот и поляризационных характеристиках (которые имеют такую же зависимость, как и собственные функции) каждого колебания становятся определяющими, поэтому задача определения собственных значений и собственных функций пьезоэлемента продолжает оставаться актуальной.

Нами была решена задача о собственных толщинно-сдвиговых объемных колебаниях осесимметричных пьезоэлементов переменной толщины после допущений, сделанных на основе анализа связи колебаний сдвига по толщине с изгибными колебаниями. В результате чего из системы трехмерных уравнений движения для анизотропных пластин были получены дифференциальное уравнение движения в частных производных с переменными коэффициентами, описывающее только колебание сдвига по толщине [1,2]. После представления решения в виде тригонометрического ряда в цилиндрической системе координат были получены рекуррентные соотношения для четырех независимых систем дифференциальных уравнений относительно

коэффициентов разложения, которые описывают все возможные моды колебаний сдвига по толщине пьезоэлемента. Решение поставленной краевой задачи позволило определять собственные значения и собственные функции осесимметричных пьезоэлементов переменной толщины. Для решения полученных систем дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами, имеющими сложную зависимость от геометрии пьезоэлемента, нами были разработаны численные методы, так как в настоящее время отсутствуют аналитические методы решения подобных задач. Оценки результатов расчета и эксперимента подтвердили эффективность разработанной модели и полученной на ее основе программ для ЭВМ. Полученные нами картины мод полного спектра акустических толщинно-сдвиговых колебаний линзового пьезоэлемента, подтвердили применимость используемой системы обозначения мод колебаний для пластин любой формы, хотя, например, в работе [3] отмечалось, что «подобная классификация мод для круглых пластин не всегда возможна». В данной работе авторы наблюдали суперпозицию двух колебаний, которые им не удалось разделить в экспериментальном исследовании.

Разработана машинная модель высокочастотного чувствительного пьезоэлементами переменной толщины и возбуждающими электродами сложной конфигурации [4,5], позволяет проводить численное исследование влияния геометрии пьезоэлемента и формы электрода на частотное расстояние между резонансными колебаниями и их интенсивность.

Частотное расстояние между резонансными колебаниями определяется, прежде всего, формой пьезоэлемента [6-8], причем чем меньше толщина пьезоэлемента в местах максимальных пучностей колебаний, тем выше его частота. Максимальные пучности для ангармонических колебаний с увеличением их индекса располагаются дальше от центра пьезоэлемента, поэтому, если толщина пьезоэлемента (частотоопределяющий размер) уменьшается к его периферии, то с возрастанием индекса существенно увеличивается и частота колебаний. Кроме того, если нам необходимо дополнительно увеличить частоту данного ангармонического колебания, то мы можем этого добиться локальным уменьшением частотоопределяющего размера в местах наибольших пучностей данного колебания.

Для увеличения расстояния между рабочими колебаниями необходимо локальное изменение толщины пьезоэлемента производить в местах минимальных смещений других рабочих колебаний, чтобы изменение частоты этих колебаний было значительно меньше изменения частоты регулируемого колебания.

Для обеспечения требуемой интенсивности рабочих колебаний и достаточного ослабления побочных резонансов необходимо найти форму электрода, как правило, сложной геометрии, которая позволит достичь желаемых результатов[5]. Численное моделирование колебаний пьезоэлементов сложной формы позволяет проводить анализ влияния формы и размеров электрода на интенсивность резонансных колебаний. Определение собственных значений пьезоэлементов, позволяет находить интегральный пьезоэлектрический заряд каждого резонансного колебания с учетом формы электрода. Для рабочих колебаний данный заряд должен быть как можно больше, для побочных его необходимо стремиться к нулю. В докладе приводятся формы электродов для двух и трехчастотных резонаторов.

Дальнейшие исследования показали, что для линзовых пьезоэлементов (ЛПЭ) можно получить приближенные аналитические зависимости собственных значений и собственных функций от радиуса сферы ЛПЭ, а не решать на ЭВМ в каждом конкретном случае сложную краевую задачу[6-8]. В работе [8] показано, что при вычислении по полученным приближенным выражениям частоты основного резонанса погрешность вычисления 0,2%..1,5%. При определении частот ангармонических колебаний она не превышала 2%. Аналогичные результаты были получены и при решении обратной задачи, т.е. при определении радиуса сферы ЛПЭ, который обеспечит заданный частотный промежуток до требуемого ангармонического колебания.

Проведенные численные исследования по разработанному алгоритму позволили также получить простые аналитические выражения для определения собственных функций ЛПЭ, которые оказались достаточно близкими к аналогичным значениям, получаемым при численном решении на ЭВМ краевой задачи по разработанному алгоритму.

Таким образом, предлагаемое моделирование чувствительных пьезоэлементов переменной толщины и полученные аналитические выражения в случае ЛПЭ позволяют проводить анализ, а для ЛПЭ – и синтез, полного спектра колебаний сдвига по толщине осесимметричных пьезоэлементов, рассчитывать соответствующие амплитуды и фазы смещений как на поверхности пьезоэлемента, так и его объеме, проводить анализ эквивалентных динамических характеристик устройства в целом и определять степень ослабления резонансных колебаний в зависимости от формы, размеров электрода.

Имеющийся у нас опыт численного анализа колебательных акустоэлектронных устройств позволяет значительно сократить натурные исследования при проектировании многочастотных пьезоэлектрических преобразователей, заменив часть их численным моделированием.

Литература

1. Postnikov I.I. "Computer Analysis of the Characteristics of High-Frequency Quartz Resonators" in Proceedings 48th Annual Symposium on FrequencyControl, IEEE, pp. 209-222, June 1994.
2. Постников И.И. Математическое моделирование характеристик и параметров ВЧ кварцевых резонаторов с пьезоэлементами переменной толщины. – Акустический журнал. 1996. – Т.42, №1. – С. 91-102.
3. Спенсер У. Исследование резонансных колебаний и нарушений структуры в монокристаллах методом рентгеновской дифракционной топографии. В кн.: Физическая акустика/ Под ред. Мэзона У., пер. с англ. М.: Мир, 1973. Т.У.-С.134-191.
4. Postnikov I.I., Христофорова Т.В. "Intensity of Resonance Vibration of AT-Cut Quartz Resonators with Circular Electrodes" in Proceedings 49th Annual Symposium on FrequencyControl, IEEE, pp. 810-817, May 1995.
5. Постников И.И., Христофорова Т.В. Динамические электрические параметры кварцевых резонаторов с электродами произвольной формы. . – Акустический журнал. 1997. – Т.43, №2. – С. 261-263.
6. Постников И.И. Частотные расстояния до ангармонических колебаний в линзовых пьезоэлементах. – Радиотехника и электроника. 1994,- Вып.3.- С. 446-448.
7. Постников И.И. Колебания сдвига по толщине в круглых пьезоэлектрических пластинах переменной толщины.- Изв.ВУЗов Радиофизика. 1994.– Т.ХХХУІІ, №12. – С.1519-1531.
8. Постников И.И. Собственные значения и собственные функции линзовых пьезоэлементов. – Акустический журнал. 1994. – Т.40, №3. – С. 426-431.