

УДК 534-16:534-8:534.6.08:621.9.048.6

ПРИМЕНЕНИЕ МЭМС-МИКРОФОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЬЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКА

Степаненко Д.А., Киндрук А.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Выполнен сравнительный анализ эффективности использования МЭМС-микрофонов и контактных пьезоэлектрических датчиков для определения собственных частот колебаний кольцевых концентраторов ультразвука интегральным методом свободных колебаний. На основе результатов экспериментальных исследований установлено, что недостатком МЭМС-микрофонов является сравнительно низкая чувствительность к собственным частотам звукового диапазона. Однако в случаях, когда эти частоты не представляют интереса, использование МЭМС-микрофонов дает по сравнению с пьезоэлектрическими датчиками такие преимущества как бесконтактный характер измерений, возможность многократного использования датчика и воспроизводимость результатов измерений.

Ключевые слова: ультразвуковые колебания, частотная характеристика, кольцевой концентратор, МЭМС-микрофон

APPLICATION OF MEMS-MICROPHONES FOR THE STUDY OF FREQUENCY RESPONSES OF RING-SHAPED ULTRASONIC HORNS

Stepanenko D., Kindruk A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The article presents comparative analysis of efficiency of MEMS-microphones and contact piezoelectric sensors in determination of natural vibration frequencies of ring-shaped ultrasonic horns by means of integral method of free vibrations. On the basis of experimental studies it was shown that the main drawback of MEMS-microphones is their relatively low sensitivity to the natural frequencies of the audible range. However in the cases, when these frequencies are not of interest, MEMS-microphones provide with regard to piezoelectric sensors such advantages as non-contact nature of measurements, possibility of repeated use of the sensor and reproducibility of measurements.

Key words: ultrasonic vibrations, frequency response, ring-shaped horn, MEMS-microphone

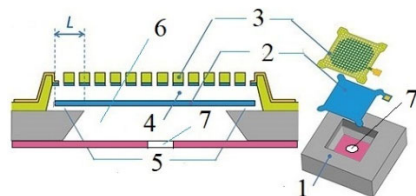
*Адрес для переписки: Степаненко Д.А., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dstepanenko@bntu.by*

Исследование частотных характеристик концентраторов ультразвуковых колебаний является актуальной практической задачей в связи с широким применением низкочастотного ультразвука в технике и медицине. Для эффективной работы колебательной системы одна из собственных частот колебаний концентратора должна быть согласована с рабочей частотой ультразвукового электроакустического преобразователя, используемого для генерации колебаний, что требует точного экспериментального определения этих частот. В неразрушающем контроле для определения собственных частот колебаний используют интегральный метод свободных колебаний, суть которого состоит в регистрации отклика контролируемого объекта на кратковременное ударное воздействие. Так как ударное воздействие создает возбуждение объекта в широкой полосе частот, ширина которой обратно пропорциональна длительности воздействия, то в контролируемом объекте одновременно возникают затухающие колебания на нескольких собственных частотах, зарегистрировав которые с помощью датчика, можно по их спектру определить набор собственных частот.

В качестве объекта измерений использовался кольцевой концентратор из среднеуглеродистой

стали со следующими геометрическими параметрами: наружный диаметр 45,5 мм; внутренний диаметр 40 мм; эксцентриситет 0,75 мм; толщина в осевом направлении 3,5 мм. Ударное воздействие производилось с помощью шарика диаметром 3,2 мм из закаленной стали ШХ15, свободно падающего по направляющей из стеклянного капилляра. Для моделирования свободных граничных условий концентратор устанавливался на подвесе в виде тонкой горизонтальной нити. Регистрация отклика концентратора производилась двумя способами: с помощью пленочного пьезоэлектрического преобразователя и с помощью микроэлектромеханического микрофона (МЭМС-микрофона). Для измерения деформаций концентратора был использован контактный пьезоэлектрический датчик модели FDT1-052K фирмы TE Connectivity (США) из поливинилиденфторида (ПВДФ). Общая толщина датчика составляет 85 мкм, что позволяет обеспечить его конформное закрепление на криволинейной поверхности концентратора. Крепление датчика выполнялось с помощью цианакрилатного клея. Регистрация звукового поля, создаваемого концентратором при ударном воздействии, производилась с помощью бесконтактного МЭМС-микрофона модели

SPU0410LR5H-QB фирмы Knowles Acoustics (США). Конструктивно микрофон изготовлен в виде SMD-элемента с размерами корпуса $3,76 \times 3 \times 1,13$ мм и имеет защиту от электромагнитных наводок. Чувствительный элемент микрофона представляет собой конденсатор, один из электродов которого выполнен в форме мембраны, деформирующейся под действием звукового давления, а второй – в форме перфорированной жесткой пластины (рис. 1).



1 – кремниевая подложка; 2 – мембрана;
3 – перфорированный электрод; 4 – воздушный зазор;
5 – вентиляционные каналы; 6 – передняя камера;
7 – акустический канал

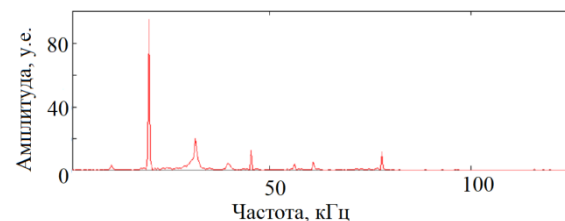
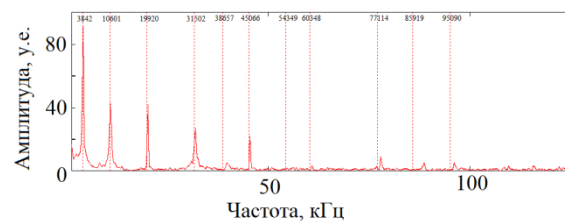
Рисунок 1 – Чувствительный элемент МЭМС-микрофона

Наличие микроперфораций в электроде позволяет минимизировать эффект демпфирования сжатой пленкой (squeezed-film damping), приводящий к возникновению собственных шумов и обусловленный движением тонкого слоя воздуха в зазоре между электродами при деформациях мембраны [1]. По краю мембраны выполняются вентиляционные каналы, служащие для выравнивания статического давления между окружающей средой и воздушным зазором.

Запись сигналов датчика и МЭМС-микрофона производилась с помощью цифрового запоминающего осциллографа, а расчет их спектров – с помощью программы Mathcad. Результаты расчета спектров представлены на рис. 2.

Числовые значения, соответствующие вертикальным линиям, представляют собой значения собственных частот, определенные методом конечных элементов с помощью программы Comsol Multiphysics. Как следует из сравнения приведенных спектров, МЭМС-микрофон обладает сравнительно низкой чувствительностью к собственным частотам звукового диапазона. Это объясняется тем, что кривая чувствительности микрофона имеет несколько максимумов в ультразвуковом диапазоне, в частности, на частотах около 20 кГц и 46 кГц. Причиной возникновения максимума чувствительности на частоте около 20 кГц является акустический резонанс в чувствительном

элементе микрофона: акустический канал в совокупности с передней камерой сенсорного элемента образуют резонатор Гельмгольца с собственной частотой, заключенной в ультразвуковом диапазоне.



а – для пьезоэлектрического датчика;
б – для МЭМС-микрофона

Рисунок 2 – Спектры сигналов

Низкая чувствительность в звуковом диапазоне не является критической проблемой для рассматриваемых в данной статье измерений, так как с точки зрения практического применения представляют интерес собственные частоты концентратора, лежащие в ультразвуковом диапазоне. Преимуществами использования МЭМС-микрофона по сравнению с пьезоэлектрическим датчиком являются бесконтактный характер измерений и более низкая стоимость. В отличие от МЭМС-микрофонов пьезоэлектрические датчики не дают возможности их многократного использования, так как монтируются на контролируемом объекте с помощью цианакрилатного клея. Пьезоэлектрические датчики более подвержены влиянию электромагнитных наводок, а на воспроизводимость измерений с их помощью влияет такой трудно контролируемый фактор, как толщина клеевого слоя между датчиком и объектом измерения.

Таким образом, в случаях, когда собственные частоты звукового диапазона не представляют интереса, использование МЭМС-микрофонов дает ряд преимуществ по сравнению с пьезоэлектрическими датчиками.

Литература

1. Tadashi, I. Study and development of low-noise MEMS acoustic sensors / I. Tadashi [et al.] // OMRON Technics. – 2019. – Vol. 50, article 012. – 7 p.