

Разработка ультразвукового мозаичного широкополосного пьезоэлектрического преобразователя для бесконтактного контроля изделий из полимерных композиционных материалов

В. К. КАЧАНОВ, И. В. СОКОЛОВ, М. А. КАРАБАЕВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия,
e-mail: kachanovvk@mail.ru

Рассмотрены проблемы, возникающие при ультразвуковом бесконтактном контроле изделий через нерезонансный воздушный промежуток. Приведены результаты разработки высокоэффективных широкополосных низкочастотных ультразвуковых пьезопреобразователей для бесконтактного контроля изделий из композиционных материалов.

Ключевые слова: ультразвук, мозаичный преобразователь, бесконтактный контроль, полимерный композиционный материал.

The problem of non-contact ultrasonic testing of products through a non-resonant air interval has been considered. The results of development of highly-sensitive broadband low-frequency ultrasonic piezoelectric transducers for non-contact testing of composite material products have been presented.

Key words: ultrasound, mosaic transducer, non-contact testing, polymer composite material.

Ультразвуковой неразрушающий контроль осуществляют, как правило, при иммерсионном контакте пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) с поверхностью контролируемого изделия. Однако для некоторых объектов недопустимо применение иммерсионных жидкостей или сухого акустического контакта преобразователя с поверхностью изделий. В этом случае используют ультразвуковые бесконтактные ПЭП, работающие через воздушный промежуток и не требующие подготовки поверхности контролируемого изделия [1].

Бесконтактный ультразвуковой контроль имеет существенный недостаток — низкую чувствительность преобразователей, обусловленную отражениями ультразвуковых колебаний (УЗК) на границе сред с различными акустическими сопротивлениями: ПЭП — воздух и воздух — изделие. Для решения этой проблемы необходимы преобразователи, которые могут эффективно излучать УЗК в воздушную среду и принимать обратно. Следует использовать методы повышения чувствительности контроля, такие как возбуждение излучающего преобразователя сигналом большой мощности, применение маломощных приемных усилителей и радиотехнических алгоритмов, увеличивающих отношение сигнал—шум.

Так как ультразвуковым бесконтактным способом чаще всего проверяют изделия из полимерных композиционных материалов, обладающих большим частотно-зависимым затуханием УЗК, то для повышения чувствительности контроль проводят в низкочастотном ультразвуковом диапазоне ($f_0 \approx 100$ кГц). При снижении частоты до 100 кГц длина волны УЗК в полимерных композиционных материалах увеличивается до 30—40 мм. Следовательно, для работы бесконтактных преобразователей в эхоимпульсном режиме длительность зондирующего сигнала не должна превышать 1—2 периодов колебаний несущей частоты для удовлетворитель-

ной разрешающей способности контроля, что требует создания бесконтактных ПЭП с широкой полосой пропускания для неискажающего преобразования коротких широкополосных импульсов.

Бесконтактные преобразователи должны иметь большой коэффициент электроакустического преобразования, чтобы компенсировать потери амплитуды сигнала при прохождении через границы разнородных сред. Обеспечить одновременное выполнение обоих условий (широкую полосу пропускания и высокую чувствительность) в бесконтактных ПЭП не удается, поэтому в большинстве случаев используют высокочастотные, т. е. высокоэффективные, но узкополосные ПЭП, с помощью которых осуществляют бесконтактный контроль в узкополосном теневом режиме. В эхоимпульсном режиме контроля бесконтактные преобразователи не используют [2].

Проблема по созданию низкочастотных бесконтактных ПЭП, характеризующихся высокой эффективностью и широкополосностью, остается актуальной и положена в основу исследований, результаты которых приведены в данной статье.

Повышение эффективности пьезопреобразователей.

Необходимая чувствительность бесконтактного контроля достигается при высоком коэффициенте электроакустического ПЭП и акустическом согласовании преобразователя с воздушной средой для уменьшения потерь на границе сред. Для повышения чувствительности часто используют ПЭП на изгибных колебаниях [3, 4], которые точнее согласуются с воздушной средой, так как их акустическое сопротивление ниже, чем у других типов ПЭП. К недостаткам изгибных ПЭП относятся чрезмерная низкочастотность, вызванная работой на частотах не выше 40 кГц [5], и неравномерность амплитуд колебаний различных областей поверхности преобразователей, что снижает направленность излучения ПЭП [6].

Иногда используют конденсаторные (электростатические) преобразователи, у которых одна из пластин конденсатора — тонкая проводящая мембрана, способная колебаться под действием падающей звуковой волны, другая же пластина неподвижна. Эффективность конденсаторных преобразователей ниже, чем пьезокерамических, однако применение таких преобразователей гарантирует более высокую точность измерений из-за использования более широкой полосы электроакустического преобразования. Недостатком электростатических преобразователей является зависимость эксплуатационных характеристик от температуры, влажности, загрязненности и т. п., что ограничивает их применение в производственных условиях и на открытом воздухе [5].

Перед разработчиками бесконтактных ПЭП стоит задача по снижению потерь сигнала на границе раздела сред, например, если через границу стали и воды проходит приблизительно 35 % сигнала, то через границу стали и воздуха — только 0,6 % [7]. Наиболее очевидный способ решения проблемы заключается в выборе толщины воздушного промежутка между преобразователем и поверхностью изделия, кратной половине длины ультразвуковой волны в воздухе. На практике не всегда возможно выполнить это условие, так как резонансный ввод ультразвукового сигнала предполагает строгое соблюдение толщины воздушного зазора. В [8] описан резонансный бесконтактный толщиномер прокатываемой фольги, в котором осуществляется воздушная связь преобразователя и изделия через зазор 40 мм на частоте $f = 100$ кГц. Аналогичный прибор с воздушной связью для контроля теневым методом прессованных материалов при $f = 300$ кГц описан в [9].

Рассмотрим бесконтактный ультразвуковой неразрушающий контроль изделий через нерезонансный воздушный промежуток, имеющий толщину много меньше длины акустической волны. В [10] приведен пример бесконтактного контроля изделий из полимерных композиционных материалов с сотовым наполнителем в теневом режиме, который позволяет выявить дефекты вида расслоение и непрочное склеивание площадью 10×10 мм.

Наибольший эффект достигается при использовании элементов, обеспечивающих согласование акустических сопротивлений преобразователя и воздуха. В [11] показана возможность повышения эффективности работы электроаку-

стических пьезокерамических преобразователей при применении согласующих элементов в виде плоскопараллельных слоев четвертьволновой толщины. Акустический импеданс переходного слоя определяется из соотношения

$Z_c \approx \sqrt{Z_n Z_v}$, где Z_n , Z_v — акустические импедансы соответственно пьезокерамики и воздуха. В качестве материала для согласующих четвертьволновых слоев используют твердый (жесткий) пенопласт, имеющий волновое сопротивление, значение которого находится в промежутке между значениями акустического сопротивления пьезокерамики и воздуха. В [9] приведен пример узкополосного ПЭП с рабочей частотой 40 кГц и четвертьволновым согласующим слоем из пенопласта, позволившего обнаруживать расслоения и непрочное склеивание площадью 7 см^2 в многослойных полимерных композиционных материалах с коэффициентом затухания УЗК не более 50 дБ/м. Другой пример описан в [12], где в качестве согласующего слоя использована композиция из пустотелых стеклянных шариков и эпоксидной смолы, которая устойчива к воздействию окружающей среды, имеет небольшое затухание и обладает механической прочностью, соизмеримой с прочностью отвержденной эпоксидной смолы.

Известен способ повышения эффективности работы низкочастотных бесконтактных ПЭП при применении перфорированных экранов, размещенных в непосредственной близости (на расстоянии 0,1—0,3 мм) от рабочей поверхности пьезопреобразователя [4], и позволяющих расширить полосу пропускания до $\Delta f_{\text{ПЭП}} \approx 7$ кГц.

Обзор существующих бесконтактных ПЭП показал, что задача создания высокоэффективных и широкополосных (с относительной полосой $\Delta f/f_0$ до 50 %) ультразвуковых пьезопреобразователей для бесконтактного контроля до сих пор не решена, так как основной способ расширения полосы преобразования этих приборов, основанный на механическом демпфировании пьезоэлемента (ПЭ) приводит к снижению его чувствительности.

В МЭИ был разработан новый тип составных (мозаичных) низкочастотных преобразователей для контроля изделий из полимерных композиционных материалов, обладающих одновременно и высокой эффективностью, и широкой рабочей полосой. Такой составной ПЭП представляет мозаику из стержневых поляризованных по высоте (продольно)

ПЭ [13]. На первом этапе использовали ПЭ одинакового сечения и высоты, которые позднее получили широкое применение как композитные [14, 15]. На следующем этапе исследований применяли набор из n разновысоких ПЭ (рис. 1, а, б), высоту h_n которых можно рассчитать по формуле

$$h_n = h_1 [(2Q + 1)/(2Q - 1)]^{n-1},$$

где Q — среднее значение добротности ПЭ, нагруженного на рабочую среду.

Выполнение этого условия обеспечивает суммарную полосу пропускания, состоящую из набора парциальных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) высокودобротных недемпфированных ПЭ с частотами f_1, f_2, f_3 (рис. 1, б). С помощью мозаичной техноло-

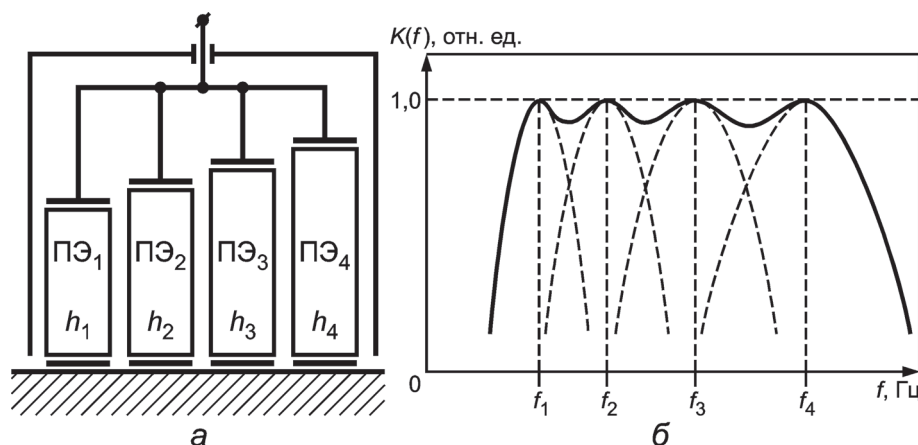


Рис. 1. Принцип конструирования (а) и амплитудно-частотная характеристика (б) мозаичного широкополосного преобразователя

гии можно получить относительную ширину полосы пропускания низкочастотного мозаичного ПЭП $\Delta f/f_0 \geq 100\%$. Особенностью составного мозаичного ПЭП является возможность поступления различного по амплитуде и временной задержке сигнала на каждый ПЭ мозаичного ПЭП, что позволяет в зависимости от задачи создавать АЧХ заданной формы [13]. Выбрав топологию мозаики (схемы расположения разновысоких ПЭ) в широкополосных мозаичных ПЭП, можно формировать пространственное распределение акустического поля требуемого вида [16].

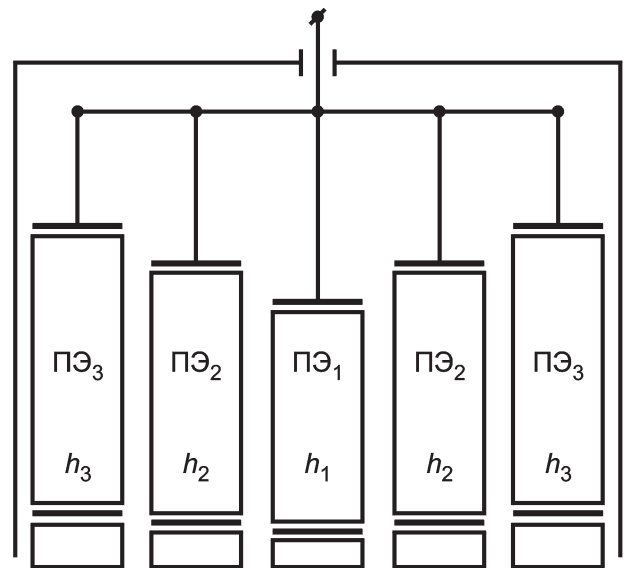
При конструировании высокоэффективных широкополосных бесконтактных ПЭП логично применять технологию мозаики как для самого пьезопреобразователя, так и для согласующих слоев. Авторы использовали четвертьволновые согласующие слои из твердого пенопласта для каждого ПЭ мозаики из пьезокерамики ЦТС-19 (рис. 2, а), толщину согласующего слоя под определенную частоту выбирали экспериментально, так как скорость звука в пластинах пенопласта зависит от толщины.

При использовании в мозаичной конструкции небольшого количества (до семи элементов) разновысоких стержневых ПЭ квадратного сечения с согласующими слоями удалось получить равномерную АЧХ с относительной шириной полосы до 38 %.

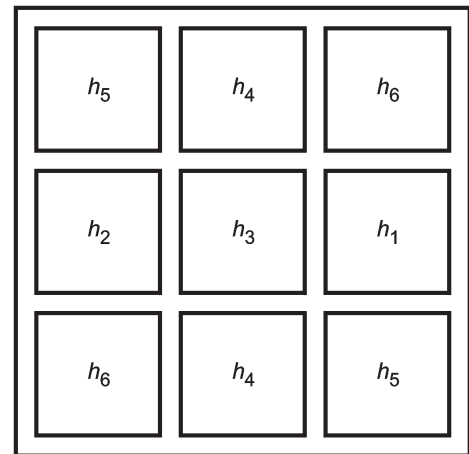
С увеличением количества разночастотных групп ПЭ в составе мозаичного бесконтактного преобразователя рабочая полоса частот расширяется, однако равномерность АЧХ снижается, становится более изрезанной, так как суммарная АЧХ зависит от многих факторов (выбора высоты пьезоэлемента, топологии мозаики и др.). На рис. 2, б показано сечение мозаичного преобразователя, состоящего из девяти стержневых ПЭ сечением 7×7 мм для различных высот ($h_1 = 13$ мм; $h_2 = 14$ мм; $h_3 = 15$ мм; $h_4 = 16$ мм; $h_5 = 17$ мм; $h_6 = 18$ мм). При этом для каждого ПЭ высотами h_1 — h_6 использовали соответствующий согласующий слой из пенопласта высотой $h_{n1} = 2,2$ мм; $h_{n2} = 2,45$ мм; $h_{n3} = 2,9$ мм; $h_{n4} = 3,2$ мм; $h_{n5} = 3,52$ мм; $h_{n6} = 3,75$ мм [17]. Результирующая АЧХ (рис. 2, в) сконструированного бесконтактного мозаичного пьезопреобразователя имеет рабочую полосу частот в диапазоне 69,0—114,5 кГц.

Выводы. В результате проведенных исследований была разработана технология изготовления низкочастотных высокоэффективных широкополосных мозаичных пьезопреобразователей с мозаичными согласующими слоями из пенопласта, предназначенных для бесконтактного ультразвукового контроля через нерезонансный воздушный промежуток. Изготовленные ультразвуковые низкочастотные мозаичные бесконтактные преобразователи с апертурой 25 мм имеют относительную рабочую полосу частот $\Delta f/f_0 \approx 50\%$ и используются в составе аппаратуры как для ультразвукового теневого, так и для эхоимпульсного бесконтактного контроля изделий из композиционных материалов.

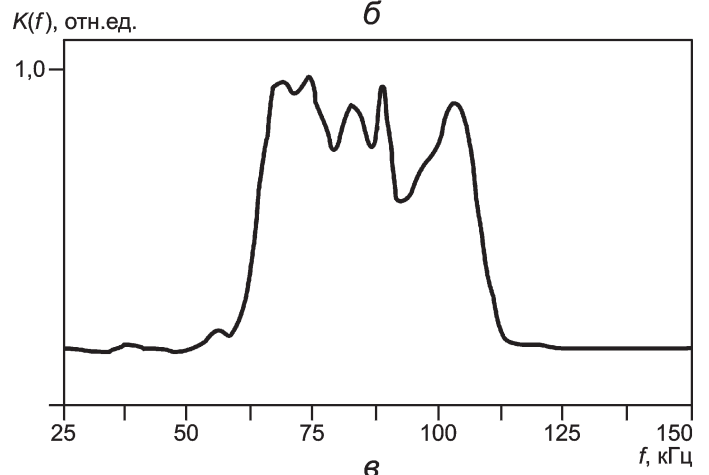
Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки РФ на 2014 г. в сфере научной деятельности (задание № 9.1044.2014/к).



а



б



в

Рис. 2. Эскиз конструкции бесконтактного мозаичного пьезопреобразователя с мозаичным согласующим слоем (а); топология 9-элементной мозаики (б); амплитудно-частотная характеристика бесконтактного 9-элементного мозаичного ПЭП (в)

Литература

1. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: Справочник: Т. 3 // Под ред. Ключева В. В. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение. 2004.

2. Шкарлет Ю. М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1974.
3. Буденков Г. А., Гуревич С. Ю. Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля (обзор) // Дефектоскопия. 1981. № 5. С. 5—33.
4. Чесаков Л. И. К вопросу о согласовании импедансов электроакустического преобразователя и газовой среды в приборах контроля уровня // Труды НИИТеплоприбор, 1973. № 80. С. 111—117.
5. Горбатов А. А., Рудащевский Г. Е. Акустические методы измерения расстояний и управления. М.: Энергоиздат, 1981.
6. Волосский В. П. Разработка бесконтактной ультразвуковой эхолокации пластмассовых сред: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. наук. М., 1985.
7. Patankar V. H. Chaurasia Reetesh and Nair Pradeep. Design and Development of Instrumentation for Air-Coupled Ultrasonics // Proc. National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation, NDE 2009. P. 185—189.
8. Бражников Н. И., Скрипалев В. С. Неразрушающий контроль материалов, изделий и сварных соединений. М.: НИИИН, 1974. С. 109—110.
9. Козлов И. Н. и др. Бесконтактный ультразвуковой контроль многослойных конструкций // Неразрушающие методы и средства контроля изделий и конструкций из неметаллов. Л., 1978. С. 18—21.
10. Автоматизированная бесконтактная ультразвуковая дефектоскопия крупногабаритных объектов из ПКМ (в том числе с сотовым наполнителем) [Офиц. сайт]. <http://6212.ua.all.biz/avtomatizirovannaya-beskontaktnaya-ultrazvukovaya-g1374493> (дата обращения 12.09.2014 г.).
11. Заклюковский В. И., Карцев Г. Т. Применение пьезоэлектрических преобразователей для бесконтактного ультразвукового контроля изделий // Дефектоскопия. 1978. № 3. С. 28—33.
12. Жданкин В. К. Ультразвуковые датчики для систем управления // Современные технологии автоматизации. 2003. № 1. С. 68—79.
13. Качанов В. К. и др. Синтез ультразвуковых низкочастотных широкополосных мозаичных преобразователей с неискажающими пространственно-временными характеристиками // Дефектоскопия. 2011. № 1. С. 3—20.
14. Newnham R. E. et al. Composite piezoelectric transducers // Mater. Eng. 1980. V. 2. P. 93—106.
15. Качанов В. К. и др. Сравнение свойств композитных и мозаичных пьезопреобразователей для УЗ контроля изделий с большим уровнем затухания УЗ сигналов // Дефектоскопия. 2011. № 8. С. 39—53.
16. Качанов В. К. и др. Пространственно-временные характеристики УЗ широкополосных преобразователей // Дефектоскопия. 2010. № 10. С. 11—25.
17. Караваев М. А., Соколов И. В. Широкополосные электроакустические пьезопреобразователи для бесконтактного УЗ-контроля // Радиотехника, электротехника и энергетика: Тез. докл. 19 Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. С. 113.

Дата принятия 12.09.2014 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

965.539.1.08

Новый класс псевдослучайных бинарных конфигураций для кодирующих коллиматоров ионизирующих излучений

Г. А. ФЕДОРОВ¹, С. А. ТЕРЕЩЕНКО², М. А. АНТАКОВ²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Москва, Россия, e-mail: GAFyodorov@mephi.ru

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ» Москва, Россия,
e-mail: tsa@miee.ru

Рассмотрены новые способы построения двумерных псевдослучайных бинарных конфигураций на основе псевдослучайных и расширенных псевдослучайных последовательностей, что позволяет использовать их для создания многопинhole кодирующих коллиматоров при регистрации ионизирующих излучений. Приведены четыре вида предлагаемых конфигураций.

Ключевые слова: интегрально-кодовая система измерений, кодирующий коллиматор, псевдослучайная последовательность, двумерная псевдослучайная бинарная конфигурация.

The new ways of creating the 2D pseudorandom binary configurations based on pseudorandom and extended pseudorandom sequences are considered. That allows to use the proposed configurations for creating the multi-pinhole coding collimators during registration of an ionizing radiation. The four types of proposed configurations are presented.

Key words: multiplexed measurement system, coding collimator, pseudorandom sequence, 2D pseudorandom binary arrays.

Интегрально-кодowymi (мультиплексными) называют системы измерений, в которых информация, поступающая от прибора (установки), имеет вид интегрального образа ис-

следуемой функциональной зависимости. На выходе мультиплексного прибора регистрируются линейные комбинации дискретных отсчетов, характеризующих искомую функцию (на-