

УДК 620.179.16:620.179.17

ЕМКОСТНОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ В РЕЖИМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПРИЕМА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, Л.В. Глебова

*Национальный технический университет «Харковский политехнический институт»,
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, тел. 8-057-707-69-34, e-mail: tiv@kpi.kharkov.ua*

Отримані співвідношення і проведені розрахунки величини акустичних зміщень поверхні для різних конфігурацій збуджуючого електроду та розроблена конфігурація приймального електроду, а також визначено його місце розташування.

Ключові слова: ультразвукові коливання, ємнісний перетворювач, об'єкт контролю, збудження, приймання, розрахунок.

Получены соотношения и проведены расчеты величины акустических смещений поверхности для различных конфигураций возбуждающего электрода и разработана конфигурация приемного электрода, а также определено его местоположение.

Ключевые слова: ультразвуковые колебания, емкостной преобразователь, объект контроля, возбуждение, прием, расчет.

The correlations and calculations of size of acoustic displacements of surface for different configurations of excitant electrode are got and configurations of receiving electrode are calculated, and also his location is determined.

Keywords: ultrasonic vibration, capacitance transducer, object control, excitement, acceptance, calculation.

Среди всех методов и средств неразрушающего контроля по широте применения первое место занимают акустические (ультразвуковые) методы [1]. Согласно принятой классификации различают контактные (мокрые) и бесконтактные средства ультразвукового неразрушающего контроля. Контактные способы обладают высокой чувствительностью по сравнению с другими способами, но тем не менее, не лишены ряда существенных недостатков (подготовка поверхности, контактная жидкость).

Из разработанных бесконтактных методов на данный момент следует отметить электромагнито-акустический способ возбуждения и приема ультразвуковых колебаний. При этом, наряду с очевидными преимуществами (бесконтактность и широкий частотный диапазон), сравнительно низкая чувствительность данного метода (по сравнению с классическими контактными) осложняет его широкое использование. Помимо электромагнито-акустического метода, в котором акустические колебания в объекте контроля (ОК) вызываются электромагнитным воздействием, существует малоизученный способ создания упругих колебаний в

поверхности ОК воздействием электростатического поля, которое создается конденсаторным способом. В работе [2] приведены результаты полученных экспериментальных исследований данного способа, которые позволяют сделать вывод о принципиальной возможности использования емкостного способа ультразвукового контроля для задач дефектоскопии. В работе [3] проведен теоретический анализ и результаты, которые описывают величину смещения материальных точек поверхности объекта ОК, которые хорошо согласуются с полученными ранее экспериментальными данными. Как показали предварительные теоретические исследования, амплитуду акустических колебаний можно увеличить в определенной зоне поверхности путем изменения конфигурации возбуждающего электрода, что дает возможность создать конструкцию датчика, позволяющего работать в режиме приема-возбуждения с максимальной эффективностью.

Задачей данной работы является проведение теоретических исследований и получение результатов, которые позволят рассчитать акустический сигнал на поверхности ОК от возбуждающих электродов различной

конфигурации, установить параметры работы емкостного преобразователя в режиме возбуждения и разработать конфигурацию приемного электрода и его местоположения с учетом критерия максимальной чувствительности емкостного метода ультразвукового контроля.

Для первого примера в качестве возбуждающего электрода в емкостном преобразователе выберем плоскую конденсаторную пластину (рис. 1, а) и эту же пластину с прямоугольным вырезом (рис. 1, б), расположенных параллельно поверхности ОК. Точка наблюдения акустической волны $M(R)$ расположена на ОК по оси x на расстоянии R .

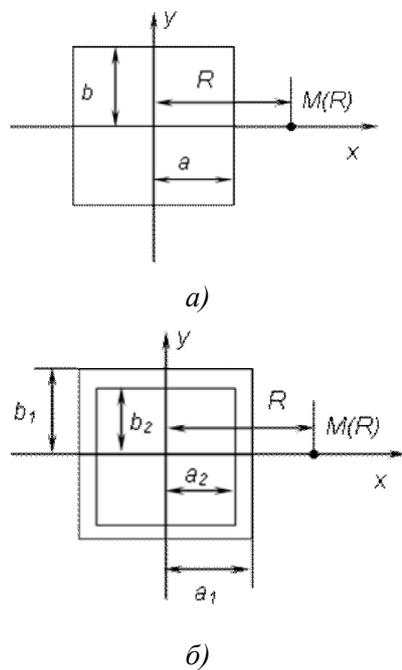


Рисунок 1 – Эскиз прямоугольной конденсаторной пластины (а) и прямоугольной конденсаторной пластины с прямоугольным вырезом (б) над поверхностью ОК

Для первого случая в принятой системе координат (рис.1) выражение для смещения поверхности $U_z(R)$ будет иметь вид [3]:

$$U_z(R) = -\frac{P_0 \sin \omega t}{2\pi K_0} \times \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{\sin\left[\frac{\omega}{c}\sqrt{(x-R)^2 + y^2}\right] - 1 - \cos\left[\frac{\omega}{c}\sqrt{(x-R)^2 + y^2}\right]}{\sqrt{(x-R)^2 + y^2}} dx dy, (1)$$

где P_0 – амплитуда возбуждающего давления, K_0 – волновое число ($K_0 = c^2 \cdot \rho$), ρ – плотность материала ОК, c – скорость звука в материале ОК, ω – циклическая частота возбуждающего напряжения.

Очевидно, что, изменив соответствующим образом пределы интегрирования и подынтегральную функцию, можно получить аналогичное выражение для точек среды вдоль координаты y , т.е. задача симметрична относительно осей координат.

Проведенный расчет акустического смещения поверхности ОК (стальной образец) при фиксированном возбуждающем давлении $P_0 = 10^4$ Па, для частот возбуждающего давления 0,1; 2; 5; 10 МГц и размеров электрода 15x15 мм представлен в виде графических зависимостей величин смещения U_z , которые приведены на рис. 2, а, б, в, г, соответственно, для данных фиксированных частот.

Анализируя графические зависимости акустического смещения U_z , можно сделать вывод, что происходит вытеснение акустического поля волны на край пластины, где наблюдается максимальная амплитуда акустических колебаний. Внутренние области пластины создают относительно низкие по амплитуде колебания упругой среды. При этом наблюдается практически полное затухание упругих волн уже на расстоянии a от края пластины, смещение точек поверхности уменьшается с ростом частоты возбуждающего давления.

Для случая прямоугольной пластины с вырезом в той же координатной системе найдем выражение для величины акустического смещения точек среды. Для этого обозначим подынтегральное выражение в формуле (1) как $\Phi(R)$ и запишем соотношение для $U_z(R)$ в виде:

$$U_z(R) = -\frac{P_0 \sin \omega t}{2\pi K_0} \left[\int_{-a_1}^{a_1} \int_{-b_1}^{b_1} \Phi(R) - \int_{-a_2}^{a_2} \int_{-b_2}^{b_2} \Phi(R) \right] dx dy. (2)$$

На рис. 3, а, б показаны графические зависимости амплитуды смещения для тех же геометрических и физических условий, что и для прямоугольной пластины, размеры прямоугольного выреза 7,5 мм (рис. 3, а) и 14 мм (рис. 3, б).

Частота зондирующего давления составляет 2 МГц. Цифрами 1 и 2 обозначены графические зависимости смещения для сплошной пластины и пластины с вырезом, соответственно.

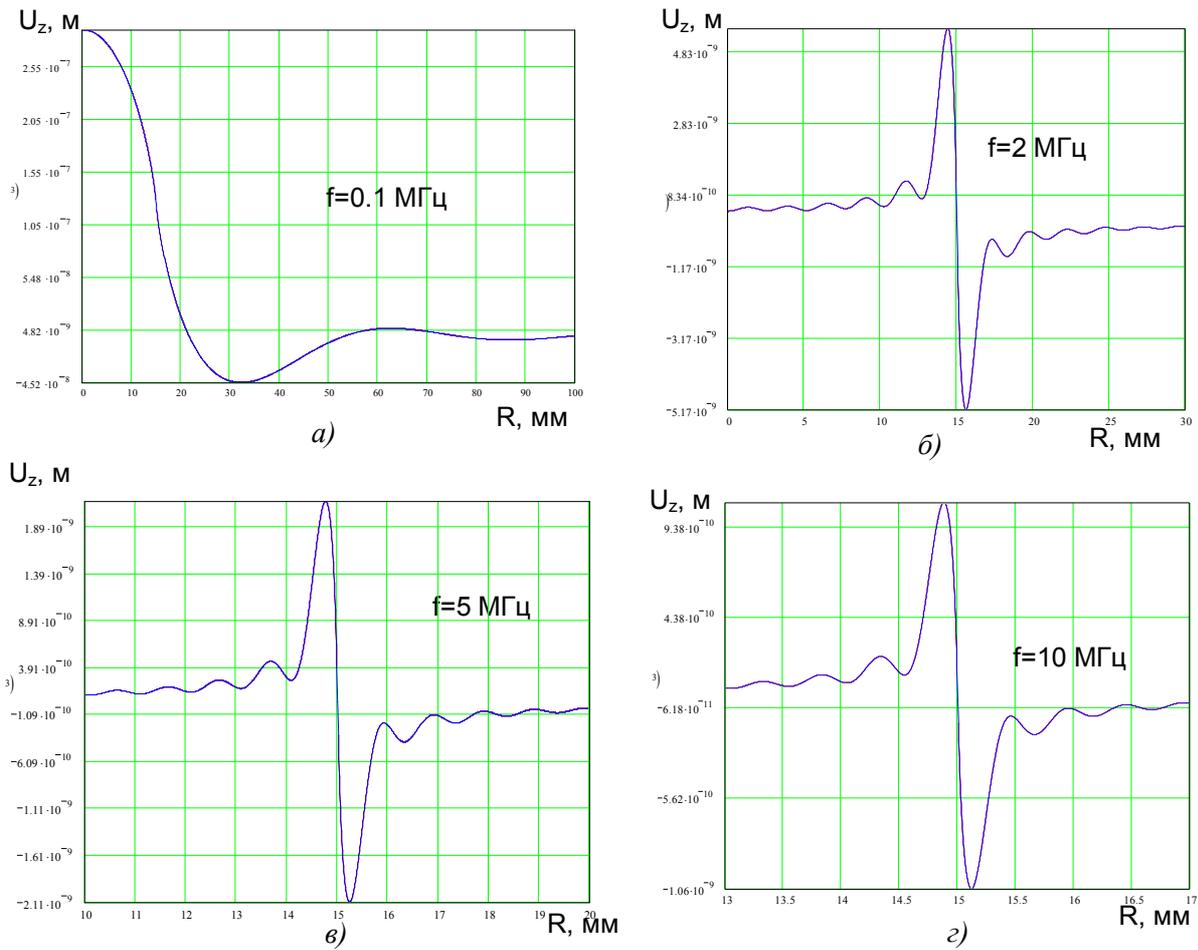


Рисунок 2 – Графические зависимости амплитуды акустических колебаний поверхности ОК

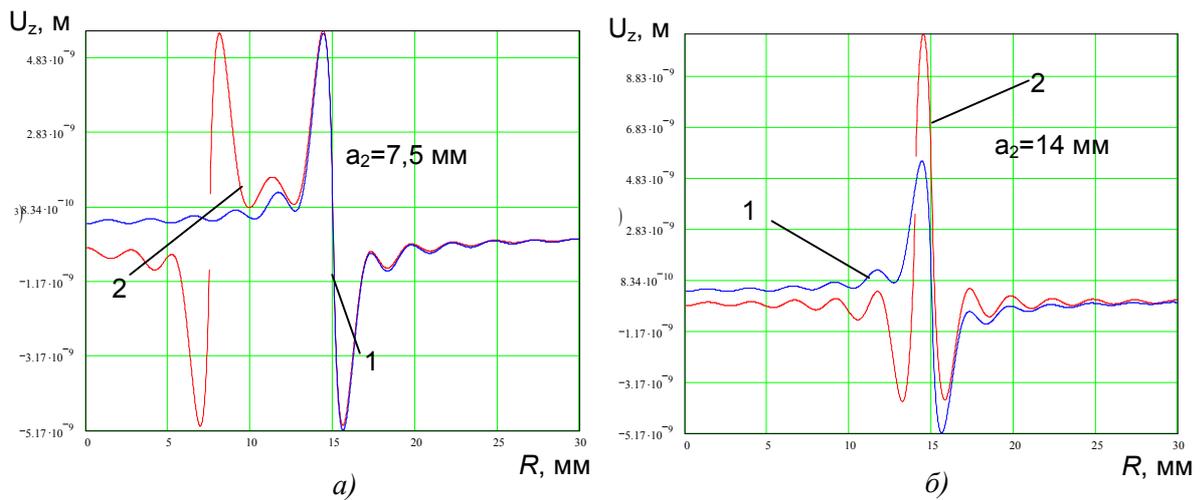


Рисунок 3 – Графики зависимости амплитуды смещения для пластины с прямоугольным вырезом

Анализируя графические зависимости, можно сделать вывод, что в этом случае появляется реакция поверхности контроля на возбуждающее давление вблизи внутренней границы электрода с практически такой же амплитудой, что и для сплошной пластины. Причем, в случае большого внутреннего выреза, наблюдается увеличение амплитуды смещения в зоне электрода.

Для второго примера рассмотрим в качестве электрода круглую пластину радиуса r_1 и по аналогии круглую пластину с внутренним вырезом радиуса r_2 , внешний вид которых приведен на рис. 4, а, б. Точка наблюдения может быть расположена произвольно относительно круга на расстоянии R (в данном случае на оси x).

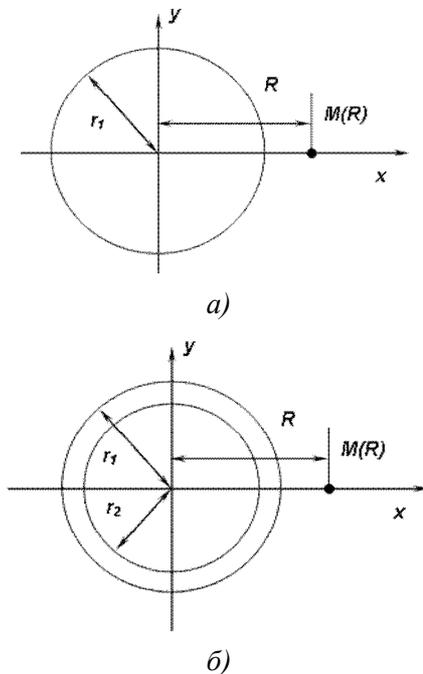


Рисунок 4 – Эскиз круглой конденсаторной пластины с круглым вырезом над поверхностью ОК

Перейдем к цилиндрическим координатам в формуле (1) и запишем выражение для упругих смещений в случае круглой пластины:

$$U_z(R) = -\frac{P_0 \sin \omega t}{4\pi K_0} \times \int_0^r \int_0^{2\pi} \frac{\sin\left(\frac{\omega}{c} r \sqrt{1 - \frac{2R}{r} \cos^2 \varphi}\right) \cdot 1 - \cos\left(\frac{\omega}{c} r \sqrt{1 - \frac{2R}{r} \cos^2 \varphi}\right)}{r \sqrt{1 - \frac{2R}{r} \cos^2 \varphi}} d\varphi dr, \quad (3)$$

где r – радиус возбуждающего электрода, φ – параметр интегрирования в цилиндрической системе координат.

Для сравнения эффектов, связанных с геометрией возбуждающего электрода, примем для расчета те же начальные параметры (давление, площадь), что и для прямоугольной пластины и получим результаты смещения $U_z(M)$ для частоты 2 МГц (рис. 5, а, б). Цифрами 1 и 2 обозначены графические зависимости смещения для сплошной пластины и пластины с вырезом, соответственно.

Как и в предыдущем случае, максимальная амплитуда акустического смещения в поверхности объекта контроля приходится на край пластины, амплитуда колебаний практически не зависит от формы пластины и наблюдается эффект увеличения амплитуды смещения для большого внутреннего выреза.

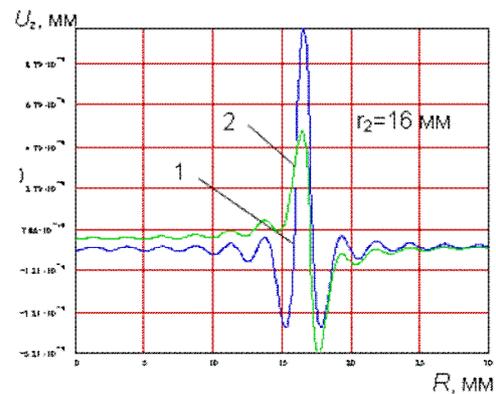


Рисунок 5 – Графики зависимости амплитуды смещения для круглой пластины

Из графических зависимостей можно также сделать вывод о том, что конфигурация плоского электрода не оказывает влияние на искоемое акустическое смещение U_z , а определяется только его размерами и амплитудой возбуждающего давления P_0 . Поэтому в дальнейших расчетах будем использовать модель плоского конденсатора с круглой пластиной. Перейдем к реальному конденсатору, сила между обкладками которого создается путем подачи на него поляризующего напряжения и определяется соотношением:

$$F = \frac{dW_c}{dz}, \quad (4)$$

где W_c – энергия конденсатора; z – переменная интегрирования, характеризующая расстояние между обкладками.

Выражение для энергии плоского конденсатора имеет простой вид [4]:

$$W_c = \frac{cU^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0SU^2}{2d}, \quad (5)$$

где U – напряжение, подаваемое на обкладки конденсатора; ε – диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 – диэлектрическая постоянная; S – площадь обкладки; d – расстояние между обкладками.

Приняв во внимание, что напряжение на обкладках конденсатора изменяется по закону $U = U_0 \sin \omega t$ и сила F действует строго перпендикулярно к площади электрода, запишем выражение для давления P_0 на поверхность ОК, которое создается электростатической силой F . Продифференцировав выражение (4) с учетом формулы (5), получим:

$$P_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0U_0^2 \sin^2 \omega t}{2d^2}. \quad (6)$$

Поскольку $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)$, то выражение (6) примет вид:

$$P_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{4d^2} (U_0^2 - U_0^2 \cos 2\omega t). \quad (7)$$

Как видно из выражения (7), при подаче на конденсатор переменного напряжения с частотой ω амплитуда давления P_0 изменяется во времени с удвоенной частотой 2ω . Для устранения данной особенности применяется поляризация конденсатора путем подачи на его обкладки постоянного напряжения U .

В таком случае выражение для давления P_0 примет вид:

$$P_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{4d^2} (U_0 \sin \omega t + U)^2 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{4d^2} (2U_0U \sin \omega t - U_0^2 \sin 2\omega t) + \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{4d^2} (U_0^2 + U^2). \quad (8)$$

Характерной особенностью полученных выражений является то, что амплитуда возбуждающего давления P_0 по сути не зависит ни от формы, ни от площади электрода. Увеличение амплитуды давления, следовательно, и амплитуды акустических колебаний, можно осуществить путем увеличения амплитуды переменного и поляризующего напряжений, подбором соответствующего материала с высокой диэлектрической проницаемостью в качестве прослойки между электродом и поверхностью ОК, или уменьшением расстояния d между обкладками конденсатора.

Для примера, выполним расчет смещения поверхности ОК в случае возбуждения акустических колебаний реальным емкостным конденсаторным преобразователем. Пусть частота возбуждающего переменного напряжения $f = 2$ МГц, амплитуда напряжения $U_0 = 500$ В. Диэлектрическая прослойка имеет толщину 0,2 мм и выполнена из титаната бария с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1000$. Подставив исходные данные в выражение (3) и (7), получим графическую зависимость переменной составляющей величины смещения поверхности ОК без поляризации, которая приведена на рис. 6, а.

Для сравнения построим графическую зависимость смещения U_z при использовании поляризации постоянным напряжением $U = 500$ В, которая показана на рис. 6, б.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что в случае использования поляризации постоянным напряжением можно получить увеличение амплитуды смещения U_z (в нашем примере в 2 раза) при подаче соответствующего постоянного поляризующего напряжения, при этом частота колебаний поверхности будет соответствовать частоте возбуждающего напряжения.

В работе [5] экспериментально установлено, что емкостной преобразователь может работать не только в режиме возбуждения ультразвуковых колебаний, но и в режиме приема.

Рассмотрим вначале возможность приема акустической волны на поверхности ОК преобразователем, который вначале за определенный промежуток времени τ_1 возбуждает акустические колебания в поверхности образца по законам, установленным выше, а после отключения возбуждающего электростатического поля переходит в режим приема ультразвуковой волны во временном промежутке τ_2 .

Очевидно, что при регистрации акустических сигналов емкость C_0 преобразователя будет изменяться из-за модуляции воздушного зазора между обкладками конденсатора под действием ультразвуковой волны.

Запишем выражение для переменной емкости емкостного преобразователя (ЕП) в режиме приема акустических колебаний в виде:

$$C = C_0 + C_{\approx} = \varepsilon\varepsilon_0 S \left(\frac{1}{d_0} + \frac{1}{\Delta d} \right), \quad (9)$$

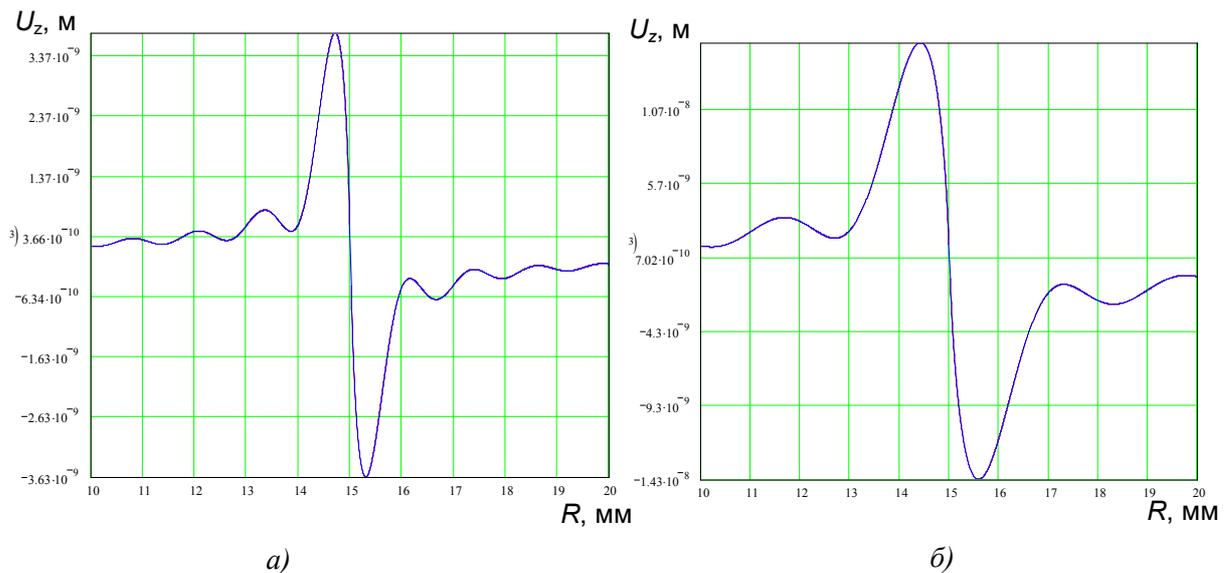


Рисунок 6 – Графики зависимости амплитуды смещения реального емкостного преобразователя без поляризации (а) и с поляризующим напряжением (б)

где d_0 – начальное расстояние между конденсаторными пластинами; Δd – приращение расстояния между конденсаторными пластинами как вследствие колебаний поверхности ОК, так и по причине колебаний электрода.

Будем считать, что отсутствует передача механического воздействия на поверхность ОК через диэлектрическую прослойку. Тогда приращение расстояния Δd между конденсаторными пластинами будет определяться только смещением точек поверхности U_z .

Рассчитаем относительное приращение емкости в режиме приема акустических колебаний в случае использования круглого возбуждающего электрода с параметрами: $S=17^2 \pi \cdot 10^{-6}$ м; $d_0=0,2 \cdot 10^{-3}$ м; $\epsilon=1000$. Среднее значение смещения U_z и оно же Δd составляет $2,718 \cdot 10^{-11}$ м. Подставим значения в формулу (9) и получим такой результат:

$$C = C_0 + C_{\approx} = 8 \cdot 10^{-6} + 4,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ф.}$$

Т.е. изменение емкости вследствие приема акустической волны будет составлять величину в 10^5 раз меньшую, чем постоянная составляющая емкости.

Если наложить на данный фактор еще и временное затухание акустического сигнала за время наблюдения τ_2 и проблемы коммутации высоких напряжений в процессе переключения работы преобразователя в режиме возбуждения-приема, то проблема измерения изменения

емкости ЕП становится трудно разрешимой. Отсюда напрашивается очевидное решение данной проблемы, а именно: осуществлять генерацию и прием акустических колебаний двумя разными емкостными преобразователями.

Внешний вид емкостного преобразователя ультразвуковых колебаний представлен на рис. 7. С генератора 5 на возбуждающий электрод 1 подается синусоидальное напряжение с амплитудой U_0 и частотой ω . В поверхности объекта контроля 4 возбуждаются акустические колебания с определенным поверхностным распределением, которые модулируют диэлектрическую прослойку 3 между объектом контроля 4 и приемным электродом 2. Сигнал в виде переменной емкости приемного электрода 3 подается на измерительный прибор 6. Расположение приемного электрода (расстояние R) и его размеры (площадь) выбираются, исходя из зоны максимальной амплитуды акустических колебаний поверхности объекта контроля, которая расположена за зоной возбуждающего электрода.

Пусть приемное устройство (рис.7) представляет собой кольцевую пластину площадью S , которая охватывает возбуждающий ЕП и расположена в зоне максимальной амплитуды смещения U_z .

Тогда, теоретически, можно найти оптимальные с точки зрения чувствительности и максимальной энергетической эффективности параметры возбуждающего и приемного емкостного преобразователя, подобрав

соответствующим образом геометрические, электрические и энергетические характеристики преобразователя.

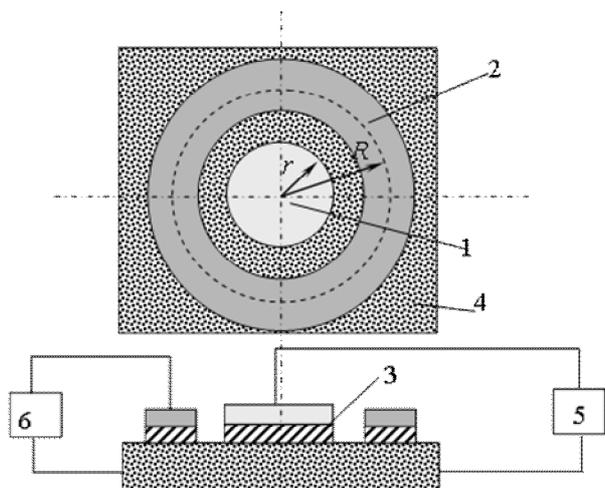


Рисунок 7 – Внешний вид емкостного преобразователя возбуждения и приема ультразвуковых акустических колебаний

ВЫВОДЫ

Емкостной преобразователь и указанная выше методика его расчета могут быть успешно использованы для проведения ультразвукового неразрушающего контроля и для создания таких преобразований с необходимыми

характеристиками.

1. Клюев В.В. *Неразрушающий контроль. Том 3. Ультразвуковой контроль* / В.В. Клюев. - М.: Машиностроение, 2004. - 864 с.
2. Сучков Г.М. Дослідження факторів, які впливають на збудження акустичних імпульсів ємнісним методом / Г.М. Сучков, Л.В. Глебова // Вісник НТУ"ХПИ". - 2008. - №48. - С.116-123.
3. Глебова Л.В. Возбуждение ультразвуковых колебаний емкостным преобразователем / Л.В. Глебова, И.В. Тюпа, А.Л. Григорьев [и др.] // Вестник НТУ"ХПИ". - 2010. - №12. - С. 192-195.
4. Тамм И.Е. *Основы теории электричества. Издание третье* / И.Е Тамм. - М.: Гос. из-во технико-теоретической литературы, 1946. - 660 с.
5. Гиттис М.Б. Определение некоторых параметров датчиков ультразвуковых колебаний / М.Б. Гиттис, В.М. Добромыслов, В.В. Сажин // Дефектоскопия. - 1971. - №1. - С. 51-57.

Поступила в редакцію 18.11.2010 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Сучков Г.М.