

МОДЕЛЬ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИЕМНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН РЕЛЕЯ

Р.П. Мигущенко¹, докт.техн.наук, Г.М. Сучков¹, докт.техн.наук, О.Н. Петрищев², докт.техн.наук, Е.Л. Ноздрачева¹, канд.техн.наук

¹ – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина. E-mail: suchkov_gm@mail.ru

² – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

Разработана математическая модель емкостного приемника высокочастотных ультразвуковых волн Релея, радиально распространяющихся в металлических листах. С помощью преобразователей емкостного типа осуществляется оперативный контроль значительных площадей изделий (листов, труб большого диаметра, значительного числа других эксплуатируемых объектов). Применение преобразователей такого типа целесообразно в системах мониторинга шумов акустической эмиссии, особенно в зонах высоких температур, радиации, а также в первичных преобразователях информационно-измерительных систем в электроэнергетике, металлургии, агрессивных химических производствах, транспорте, в комплексах экологического контроля окружающей среды. Библ. 8, рис. 5.

Ключевые слова: метрология, электромеханический преобразователь, ультразвуковая диагностика, неразрушающий контроль, экологический мониторинг.

Введение. Известные контактные и бесконтактные методы ультразвукового контроля металлоизделий имеют ряд недостатков: требуют применения контактной жидкости, очистки поверхности изделия [5], мощных генераторов и источников магнитного поля [8], сложности контроля тонких материалов, высокая стоимость и др. Устранить часть указанных недостатков возможно за счет возбуждения и приема ультразвуковых импульсов путем воздействия поляризующего электрического и высокочастотного электромагнитного полей на поверхность электропроводного материала [4]. В то же время авторы [3, 5] утверждают, что чувствительность такого способа на несколько порядков меньше, чем традиционных методов, и в промышленности его использовать в настоящее время невозможно. Однако этому утверждению противоречат результаты экспериментальных исследований [4, 6]. Отмеченное противоречие требует проведения глубоких теоретических и экспериментальных исследований предложенного физического эффекта, которые были начаты в работе [7].

Мы считаем, что разработка нового направления даст возможность заполнить нишу по диагностике материалов, недостаточно охваченных традиционными методами (нержавеющих сталей, сплавов на основе титана и меди), реализовать контроль толщины сверхтонких изделий, существенно снизить стоимость преобразователей и др.

Целью работы является создание математической модели приемника емкостного типа, установление и рационализация факторов, существенно влияющих на величину амплитуды измеряемой поверхностной ультразвуковой волны Релея.

Результаты разработки. Для построения математической модели электромеханического преобразователя (рис. 1) емкостного типа (ЕП) в режиме приема ультразвуковых волн воспользуемся теоремой Шокли-Рамо [2], согласно которой электрический ток $i(t)$, подходящий к заземленному электроду, когда в его окрестности пролетает со скоростью $\vec{v}(x_k, t)$ точечный электрический заряд q_0 , определяется как

$$i(t) = -q_0 \vec{E}^*(x_k) \cdot \vec{v}(x_k, t), \quad (1)$$

где $\vec{E}^*(x_k) = \vec{E}(x_k)/U_0$; $\vec{E}(x_k)$ - вектор напряженности электрического поля в пустоте в точке с координатами x_k , в кото-

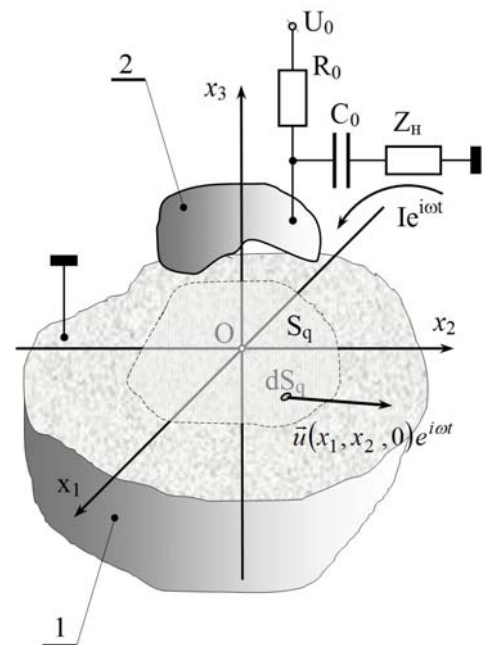


Рис. 1

рой в момент времени t находится движущийся со скоростью $\vec{v}(x_k, t)$ точечный электрический заряд q_0 ; U_3 - электрический потенциал, который необходимо подключить к электроду для создания электрического поля напряженностью $\vec{E}(x_k)$.

Рассмотрим металлическое полупространство (позиция 1 на рис. 1), над поверхностью $x_3 = 0$ которого располагается электрод 2 произвольной формы. На электрод подается постоянный потенциал U_0 . При этом на поверхности полупространства формируется область S_q с наведенным статическим электрическим зарядом с поверхностной плотностью $\sigma^0(x_1, x_2)$. Под электродом распространяется ультразвуковая волна Релея со смещениями поверхности металла $\vec{u}(x_1, x_2, 0)e^{i\omega t}$, где $\vec{u}(x_1, x_2, 0)$ - амплитудное значение вектора смещения материальных частиц поверхности металлического полупространства; $i = \sqrt{-1}$; ω - круговая частота. При этом элементарная площадка dS_q поверхности со статическим зарядом $dq = \sigma^0(x_1, x_2)dS_q$ движется относительно электрода со скоростью $\vec{v}(x_1, x_2, t) = i\omega\vec{u}(x_1, x_2, 0)e^{i\omega t}$. Этот участок можно рассматривать как точечный заряд, который в цепи переменного тока, состоящей из разделительного конденсатора C_0 и комплексного нагрузочного сопротивления Z_n , формирует электрический ток

$$dI e^{i\omega t} = -\frac{i\omega}{U_3} \sigma^0(x_1, x_2) [\vec{E}(x_1, x_2, 0) \cdot \vec{u}(x_1, x_2, 0)] dS_q e^{i\omega t}, \quad (2)$$

где $\vec{E}(x_1, x_2, 0)$ - напряженность электрического поля, создаваемого в вакууме электродом при подаче на него электрического потенциала U_3 .

Амплитудное значение тока I , подходящего к электроду, рассчитывается по формуле

$$I = -\frac{i\omega}{U_3} \int_{S_q} \sigma^0(x_1, x_2) [\vec{E}(x_1, x_2, 0) \cdot \vec{u}(x_1, x_2, 0)] dS_q. \quad (3)$$

На нагрузочном сопротивлении формируется падение напряжения с амплитудным значением $Z_n I$, несущим информацию об амплитуде смещений волн Релея.

Математическая модель ЕП в режиме приема поверхностных ультразвуковых волн в общем случае определяется следующим выражением:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{i\omega Z_n}{U_3} \int_{S_q} \sigma^0(x_1, x_2) [\vec{E}(x_1, x_2, 0) \cdot \vec{u}(x_1, x_2, 0)] dS_q. \quad (4)$$

Для примера рассмотрим математическую модель преобразователя с дисковым электродом в режиме приема радиально распространяющихся волн Релея. Расчетная схема преобразователя показана на рис. 2. Предположим, что из точки O' , как из центра, излучаются осесимметричные, радиально распространяющиеся волны Релея. В цилиндрической системе координат (r, ψ, z') , начало которой находится в точке O' , ось z' совмещена с осью $O'x'_3$ (рис. 2, а). Компоненты вектора смещения материальных частиц металлического полупространства запишем в виде

$$\begin{aligned} u_r(r, z', \omega) &= A_R(\omega) u_r(z', \gamma_R) H_1^{(2)}(\gamma_R r), \\ u_z(r, z', \omega) &= A_R(\omega) u_z(z', \gamma_R) H_0^{(2)}(\gamma_R r), \end{aligned} \quad (5)$$

где $u_r(r, z', \omega)$ и $u_z(r, z', \omega)$ - амплитудные значения изменяющихся во времени по закону $e^{i\omega t}$ компонентов вектора смещения материальных частиц поверхности металлического полупространства; $A_R(\omega)$ - амплитудный множитель волн Релея, формируемых их источником; $u_r(z', \gamma_R)$ и $u_z(z', \gamma_R)$ - радиальный и аксиальный компоненты собственного вектора однородной граничной задачи, которые

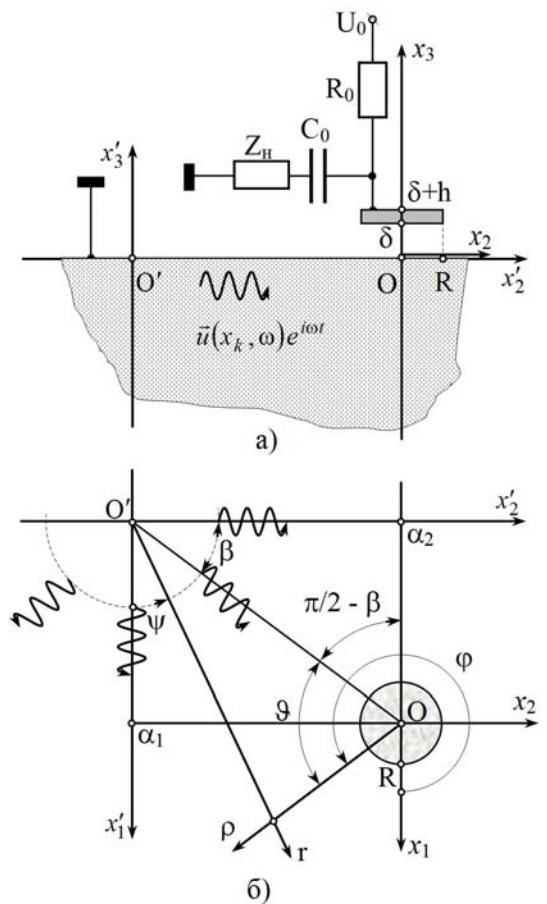


Рис. 2

задаются следующими расчетными формулами

$$u_r(z', \gamma_R) = e^{\alpha z'} - \frac{2\alpha\beta}{\gamma_R^2 + \beta^2} e^{\beta z'}, \quad u_z(z', \gamma_R) = -\frac{\alpha}{\gamma_R} \left[e^{\alpha z'} - \frac{2\gamma_R^2}{\gamma_R^2 + \beta^2} e^{\beta z'} \right], \quad (6)$$

где волновые числа α , β и γ_R связаны между собой условием существования распространяющейся волны Рэлея, которое записывается в следующем виде:

$$\Delta_R(\chi_R) = (\gamma_R^2 + \beta^2)^2 - 4\gamma_R^2\alpha\beta = 0, \quad \chi_R = \gamma_R^2.$$

Символами $H_0^{(2)}(\gamma_R r)$ и $H_1^{(2)}(\gamma_R r)$ в формулах (5) обозначены функции Ханкеля второго рода нулевого и первого порядков.

На расстоянии R_0 от центра O' располагается дисковый приемник ультразвуковых волн. В системе координат (ρ, φ, z) , центр которой находится в точке O , а ось z совмещена с осью Ox_3 , диск радиуса R создает осесимметрично распределенный по поверхности металла статический электрический заряд, поверхностная плотность $\sigma^0(\rho)$ которого определяется согласно [7] следующей формулой:

$$\sigma^0(\rho) \approx -\frac{\chi_0 U_0}{\delta} \int_0^{x_{\max}} x W(x) J_0\left(x \frac{\rho}{R}\right) dx, \quad (7)$$

где $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - диэлектрическая проницаемость вакуума; δ - расстояние (неконтакт) между нижней поверхностью диска и поверхностью металлического полупространства; параметр $x_{\max} \geq 40$; $J_0(x\rho/R)$ - функция Бесселя нулевого порядка; $W(x)$ - функция, определяющая влияние геометрических параметров диска, $W(x) = e^{-x\delta/R} \frac{(1 - e^{-xh/R}) J_1(x)}{(xh/R) x}$, где $J_1(x)$ - функция Бесселя первого порядка.

Напряженность электрического поля в пустом пространстве под диском определяется по методике, изложенной в статье [7]. При этом радиальный и аксиальный компоненты вектора напряженности электрического поля определяются следующими расчетными формулами:

$$E_\rho(\rho, z) = \frac{C_0^* U_0}{2\pi R^2 \chi_0} \int_0^{x_{\max}} x W(x) e^{xz/R} J_1\left(x \frac{\rho}{R}\right) dx,$$

$$E_z(\rho, z) = -\frac{C_0^* U_0}{2\pi R^2 \chi_0} \int_0^{x_{\max}} x W(x) e^{xz/R} J_0\left(x \frac{\rho}{R}\right) dx, \quad (8)$$

где C_0^* - электрическая емкость уединенного дискового электрода.

На рис. 3 показаны результаты вычислений по формулам (8), выполненные в предположении, что $C_0^* \approx \pi R^2 \chi_0 / \delta$; $U_0 = 1$ В; $\delta = 0,1$ мм; $R = 5$ мм; для $h = 1$ мм (рис. 3, а) и $h = 5$ мм (рис. 3, б). Цифры возле кривых соответствуют значению аксиальной координаты z в единицах неконтакта δ . Анализ приведенных данных показывает, что при конструировании преобразователей емкостного типа необходимо использовать тонкие диски. Запишем формулу (4) в цилиндрической системе координат (ρ, φ, z)

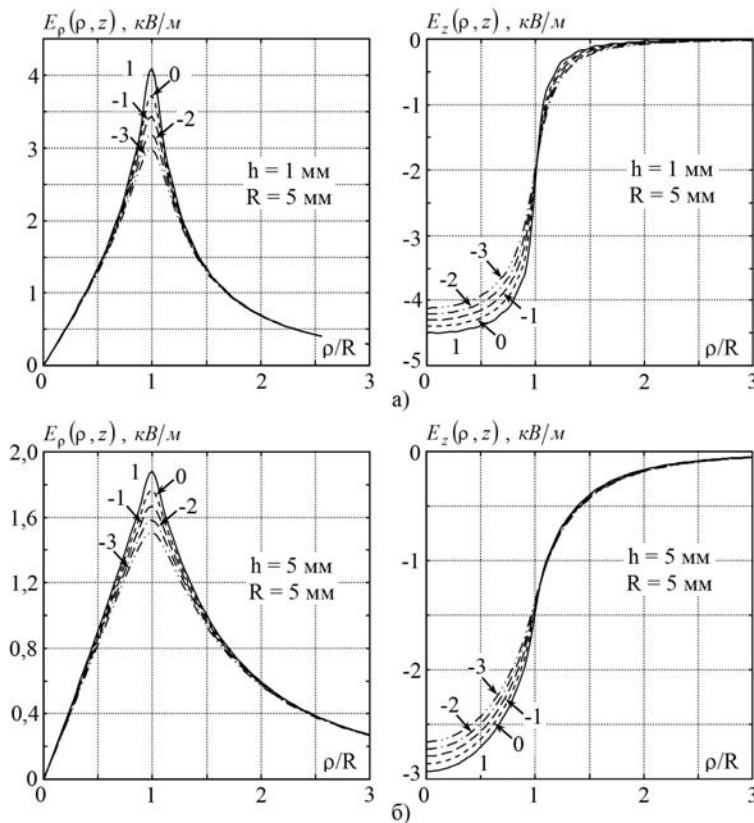


Рис. 3

$$U_{\text{вых}} = -\frac{i\omega}{U_3} Z_{\text{н}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \rho \sigma^0(\rho) [E_{\rho}(\rho, 0) u_r(r, 0, \omega) + E_z(\rho, 0) u_z(r, 0, \omega)] d\rho d\varphi, \quad (9)$$

где $u_r(r, 0, \omega) = A_R(\omega) \frac{k_s^2}{2\gamma_R^2} H_1^{(2)}(\gamma_R r)$; $u_z(r, 0, \omega) = A_R(\omega) \frac{\alpha k_s^2}{\gamma_R(\gamma_R^2 + \beta^2)} H_0^{(2)}(\gamma_R r)$.

Из рис. 2, б следует, что $r = \sqrt{\rho^2 - 2R_0\rho \cos \vartheta + R_0^2}$. Из [1] известно, что

$$H_0^{(2)}\left(\gamma_R \sqrt{\rho^2 - 2R_0\rho \cos \vartheta + R_0^2}\right) = J_0(\gamma_R \rho) H_0^{(2)}(\gamma_R R_0) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\gamma_R \rho) H_n^{(2)}(\gamma_R R_0) \cos(n\vartheta). \quad (10)$$

Так как $\vartheta = \varphi + \alpha - 3\pi/2$, то

$$\int_0^{2\pi} H_0^{(2)}\left(\gamma_R \sqrt{\rho^2 - 2R_0\rho \cos \vartheta + R_0^2}\right) d\varphi = 2\pi J_0(\gamma_R \rho) H_0^{(2)}(\gamma_R R_0). \quad (11)$$

Для того чтобы записать радиальный компонент $u_r(r, 0)$ вектора смещения в цилиндрической системе координат (ρ, φ, z) , необходимы три этапа преобразований.

1. Выполняется переход от системы координат (r, ψ, z') к связанной с ней праввинтовой декартовой системе координат (x'_1, x'_2, x'_3) (рис. 2, б) по формулам

$$u'_1(x'_1, x'_2) = u_r(r, 0, \omega) \cos \psi = \frac{x'_1 u_r(x'_1, x'_2, 0, \omega)}{\sqrt{(x'_1)^2 + (x'_2)^2}}, \quad u'_2(x'_1, x'_2) = u_r(r, 0, \omega) \sin \psi = \frac{x'_2 u_r(x'_1, x'_2, 0, \omega)}{\sqrt{(x'_1)^2 + (x'_2)^2}}. \quad (12)$$

2. В формулах (12) выполняется переход к праввинтовой декартовой системе координат (x_1, x_2, x_3) (рис. 2, б), связанной с осью симметрии дискового электрода,

$$u_k(x_m) = u'_k(x'_m), \quad k, m = 1, 2, \quad (13)$$

где компоненты $u'_k(x'_m)$ заданы соотношениями (12). Аргументы x'_m этих функций заменяются на аргументы x_m по формулам: $x'_1 = x_1 + \alpha_1$, $x'_2 = x_2 + \alpha_2$ (рис. 2, б).

3. По известным $u_k(x_m)$ определяются компоненты $u_{\rho}(\rho, \varphi, 0)$ и $u_{\varphi}(\rho, \varphi, 0)$ в цилиндрической системе координат, ось z которой проходит через центр диска,

$$\begin{aligned} u_{\rho}(\rho, \varphi, 0) &= u_1(\rho, \varphi, 0) \cos \varphi + u_2(\rho, \varphi, 0) \sin \varphi, \\ u_{\varphi}(\rho, \varphi, 0) &= -u_1(\rho, \varphi, 0) \sin \varphi + u_2(\rho, \varphi, 0) \cos \varphi, \end{aligned} \quad (14)$$

где функции $u_k(\rho, \varphi, 0)$ ($k=1, 2$) заданы соотношениями (13), в которых $x_1 = \rho \cos \varphi$ и $x_2 = \rho \sin \varphi$ соответственно.

Выполнив необходимые вычисления, получаем выражение для расчета величин $u_{\rho}(\rho, \varphi, 0)$

$$u_{\rho}(\rho, \varphi, 0) = A_R(\omega) \frac{k_s^2}{2\gamma_R^2} \frac{(\rho - R_0 \cos \vartheta)}{\sqrt{\rho^2 + R_0^2 - 2\rho R_0 \cos \vartheta}} H_1^{(2)}\left(\gamma_R \sqrt{\rho^2 + R_0^2 - 2\rho R_0 \cos \vartheta}\right). \quad (15)$$

Продифференцируем левую и правую части равенства (11) по параметру ρ

$$\int_0^{2\pi} \frac{(\rho - R_0 \cos \vartheta)}{\sqrt{\rho^2 + R_0^2 - 2\rho R_0 \cos \vartheta}} H_1^{(2)}\left(\gamma_R \sqrt{\rho^2 + R_0^2 - 2\rho R_0 \cos \vartheta}\right) d\varphi = 2\pi J_1(\gamma_R \rho) H_0^{(2)}(\gamma_R R_0).$$

Таким образом

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} u_{\rho}(\rho, \varphi, 0) d\varphi &= 2\pi A_R(\omega) \frac{k_s^2}{2\gamma_R^2} J_1(\gamma_R \rho) H_0^{(2)}(\gamma_R R_0), \\ \int_0^{2\pi} u_z(\rho, \varphi, 0) d\varphi &= 2\pi A_R(\omega) \frac{\alpha k_s^2}{\gamma_R(\gamma_R^2 + \beta^2)} J_0(\gamma_R \rho) H_0^{(2)}(\gamma_R R_0). \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляя интегралы (16) в (9), получаем выражение для расчета сигнала на электрическом выходе дискового преобразователя в режиме приема радиально распространяющихся волн Рэлея

$$U_{\text{вых}} = i A_R(\omega) H_0^{(2)}(\gamma_R R_0) W_0 W^n(\Omega), \quad (17)$$

где W_0 - абсолютная чувствительность дискового приемника волн Рэлея; $W^n(\Omega)$ - его волновая харак-

теристика.

Абсолютная чувствительность дискового ЕП рассчитывается по формуле

$$W_0 = Z_{\text{н}} \frac{U_0 C_0^* v_s}{2(\gamma_R/k_s)^3 \delta R}. \quad (18)$$

Для значений $Z_{\text{н}}=100$ кОм, $U_0=1$ кВ, $C_0^*=2$ пФ, $v_s=3298$ м/с, $(\gamma_R/k_s)=1,83842$, $\delta=0,1$ мм и $R=5$ мм абсолютная чувствительность $W_0=1,062 \cdot 10^5$ В/м, что на четыре порядка меньше абсолютной чувствительности пьезоэлектрических приемников, но всего на порядок меньше чувствительности приемников электромагнитного типа [3]. Этот вывод подтверждает возможность достижения чувствительности, достаточной для выполнения высокоточных измерений и контроля качества.

Волновая характеристика $W^n(\Omega)$ дискового приемника определяется следующим выражением:

$$W^n(\Omega) = \Omega \int_0^{\infty} [f_p(\xi) + f_z(\xi)] d\xi, \quad (19)$$

где $\Omega = \gamma_R R$ - безразмерное волновое число или, что то же самое, безразмерная частота; $\xi = \rho / R$ - безразмерная радиальная координата. Функции $f_p(\xi)$ и $f_z(\xi)$ определяются следующими расчетными формулами:

$$f_p(\xi) = \xi \tilde{\sigma}^0(\xi) \tilde{E}_\rho(\xi, 0) J_1(\Omega \xi), \quad f_z(\xi) = -\frac{2\alpha\gamma_R}{\gamma_R^2 + \beta^2} \xi \tilde{\sigma}^0(\xi) \tilde{E}_z(\xi, 0) J_0(\Omega \xi).$$

При этом

$$\tilde{\sigma}^0(\xi) = \tilde{E}_z(\xi, 0) = \int_0^{x_{\text{max}}} x W(x) J_0(x \xi) dx,$$

$$\tilde{E}_\rho(\xi, 0) = \int_0^{x_{\text{max}}} x W(x) J_1(x \xi) dx.$$

Для выбора реального значения верхнего предела интегрирования исследовано изменение функций $f_p(\xi)$ и $f_z(\xi)$ при различных значениях безразмерной частоты Ω при $\delta = 0,1$, $h = 0,1$ мм и $R = 5$ мм, рис. 4. Вычисления проводились в предположении, что $2\alpha\gamma_R / (\gamma_R^2 + \beta^2) = 1,489$, что соответствует среднему для сталей значению коэффициента Пуассона $\nu = 0,27$. Цифры возле кривых в поле рисунка соответствуют значениям безразмерной частоты Ω . Все без исключения функции $f_p(\xi)$ при малых значениях безразмерной радиальной координаты ($\xi < 0,1$) положительны, а все функции $f_z(\xi)$ отрицательны.

Из показанных на рис. 4 результатов вычислений следует, что при $\xi \geq 2$ функции $f_p(\xi)$ и $f_z(\xi)$ практически равны нулю, т. е. безразмерная координата $\xi = 2$ является технической бесконечностью для дискового приемника поверхностных волн Рэлея.

С учетом этого факта были проведены вычисления по формуле (19) для диска с параметрами $\delta=0,1$ и $R=5$ мм. Варьируемым параметром выбрана толщина диска, значения которой принимались равными $h=0,1$ мм, $h=1$ мм и $h=10$ мм. Эти цифры проставлены возле соответствующих кривых в поле рис. 5, где представлены результаты вычисления модуля волновой характеристики $W^n(\Omega)$. Отчетливо видно, что диск наименьшей толщины является наилучшим приемником поверх-

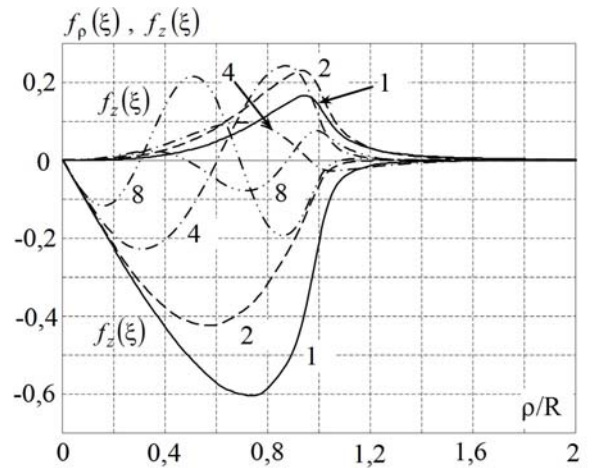


Рис. 4

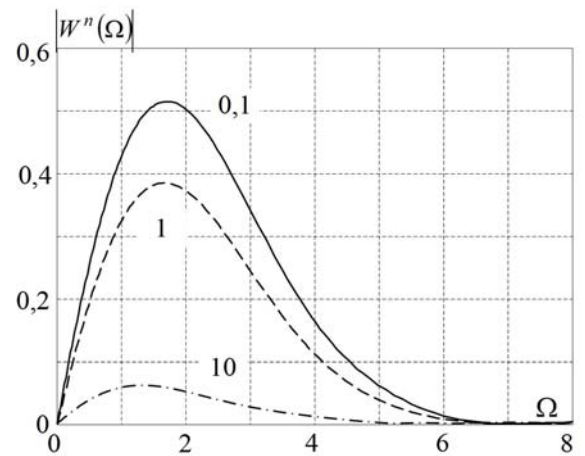


Рис. 5

ностных волн Рэлея. С ростом толщины диска наблюдается уменьшение максимальных значений модуля волновой характеристики. При этом можно заметить незначительное смещение максимального значения функции $W^n(\Omega)$ в область низких частот. Эти особенности частотно зависимого изменения функции $W^n(\Omega)$ можно объяснить интерференцией (сложением) в объеме диска подтекающих токов, которые наводятся колебаниями различных участков поверхности металлического полупространства. Диск минимальной толщины реагирует на колебания элементов поверхности металла, находящихся непосредственно под диском. На низких частотах, когда длина поверхностной волны Рэлея больше диаметра диска, элементы этой поверхности колеблются практически синфазно, и наводимые токи имеют практически один знак (фазу). Это наблюдается на восходящем участке кривой волновой характеристики $W^n(\Omega)$. При дальнейшем повышении частоты длина рэлеевской волны становится меньше диаметра диска и некоторые участки поверхности металла генерируют токи противоположного знака. Суммарный ток начинает уменьшаться. На высоких частотах под поверхностью диска располагается практически равное число областей, каждая из которых генерирует токи противоположных знаков. Результирующий ток через дисковый электрод становится практически равным нулю. Чем толще электрод, тем эффективнее собираются токи, которые наводятся более удаленными от центра электрода областями поверхности металлического полупространства. Это приводит к уменьшению результирующего значения тока, т.е. к уменьшению эффективности процесса регистрации поверхностной волны Рэлея.

Выводы. Разработана математическая модель ультразвукового приемного преобразователя поверхностных волн Рэлея емкостного типа для использования в метрологии и информационно-измерительной технике для сложных или опасных условий эксплуатации.

Установлена связь между длиной волны Рэлея и размерами приемного электрода преобразователя. Показано, что для приема более высокочастотных поверхностных волн необходимо уменьшать размер дискового электрода приемника. Очевидно, что для повышения чувствительности приема высокочастотных импульсов можно использовать несколько соединенных согласно по электрическому полю электродов малых размеров.

Из полученного выражения для ЭДС на выходе приемного электромеханического ультразвукового преобразователя следует, что основными факторами повышения чувствительности датчика являются: повышение постоянного напряжения между изделием и электродом; уменьшение расстояния между электродом и поверхностью изделия при сохранении стойкости к электрическому пробое; повышение емкости преобразователя, что выражается через увеличение диэлектрической проницаемости прослойки между электродом и поверхностью металла и увеличение эффективного размера электрода с секциями, принимающими синфазные сигналы.

1. *Ватсон Г.Н.* Теория бесселевых функций. Часть первая. – Москва: Издательство иностранной литературы, 1949. – 799 с.
2. *Гринберг Г.А.* Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – Москва-Ленинград: Изд-во АН СССР, 1948. – 728 с.
3. *Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Потанов А.И.* Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля. – Москва: Высшая школа, 1991. – 283 с.
4. *Кондратьев А.И., Луговой В.А.* Датчик акустических сигналов для высокоточных измерений // Дефектоскопия. – 1990. – № 3. – С. 30–38.
5. *Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.* Неразрушающий контроль: Справочник. Ультразвуковой контроль. – Москва: Машиностроение, 2004. – 864 с.
6. *Ноздрачова Е.Л., Сучков Г.М., Петрищев О.Н.* Особенности возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным преобразователем // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація». – 2015. – № 1 (28). – С. 165–171.
7. *Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Ноздрачева Е.Л., Карпусь В.В.* О возбуждении ультразвуковых волн в металлах емкостным преобразователем. Часть 1 // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2015. – № 1. – С. 45–50.
8. *Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Cherednichenko I.V., Fedorov V.V., Desyatnichenko A.V., Khashchina S.V., Maslova M.S.* Generator of Probing Pulses for EMA Flaw Detectors // Russian Journal of Nondestructive Testing. – New York, 2012. – Vol. 48. – No 9. – Pp. 537–540.

МОДЕЛЬ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИЙМАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ РЕЛЕЯ

Р.П. Мигущенко¹, докт.техн.наук, **Г.М. Сучков¹**, докт.техн.наук, **О.М. Петришев²**, докт.техн.наук,
Ноздрачова К.Л.¹, канд.техн.наук

¹ - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна. E-mail: suchkov_gm@mail.ru

² - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

Розроблено на основі електростатичного високовольтного поля модель приймача високочастотних ультразвукових хвиль Релея, що поширюються по поверхні металевих виробів. Застосування таких перетворювачів дозволяє проводити оперативний контроль значних площ виробів (листів, труб великого діаметра, значної кількості інших експлуатованих об'єктів). Високоєфективне застосування перетворювачів такого типу доцільне в області акустичної емісії, особливо в зонах високих температур, радіації та інших областях інформаційно-вимірювальних систем в електроенергетиці, металургії, агресивних хімічних виробництвах, транспорті, екологічному сегменті. Бібл. 8, рис. 5.

Ключові слова: метрологія, електромеханічний перетворювач, ультразвукова діагностика, неруйнівний контроль, екологічний моніторинг.

MODEL OF ELECTROMECHANICAL RECEIVING TRANSDUCERS OF ULTRASOUND RAYLEIGH WAVE

R.P. Myhushchenko¹, **G.M.Suchkov¹**, **O.N.Petrishchev²**, **K.L.Nozdrachova¹**

¹ – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
Frunze str., 21, Kharkiv, Ukraine, 61002, E-mail: suchkov_gm@mail.ru

² – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

The article deals with the model of the receiver high-frequency ultrasonic pulse Rayleigh waves that extending along the metal surface products. Application of such transducers allows to carry out operational control of large areas of products (sheets, large diameter pipes, a considerable number of other objects of the exploited). Highly efficient applying transducers of this type in the field of acoustic emission, especially in areas of high temperatures, radiation and other fields of information-measuring systems in the power industry, metallurgy, aggressive chemical production, transport, environmental segment. References 8, figures 5.

Key words: metrology, the electromechanical transducer, ultrasound diagnostics, non-destructive testing, environmental monitoring.

1. *Vatson G.N.* Theory of Bessel functions. Part one. – Moskva: Izdatelstvo inostranoi literatury, 1949. – 799 p. (Rus)

2. *Grinberg G.A.* Selected problems of mathematical theory of electrical and magnetic phenomena. – Moskva-Leningrad: Izdatelstvo AN SSSR, 1948. – 728 p. (Rus)

3. *Ermolov I.N., Aleshin N.P., Potapov A.I.* Non-destructive testing: Pract. Manual: 5 book, Vol. 2. Acoustic methods of monitoring. – Moskva: Vysshaya shkola, 1991. – 283 p. (Rus)

4. *Kondratyev A.I., Lugovoy V.A.* The sensor of acoustic signals for high-precision measurement // Defektoskopiia. – 1990. – No 3. – Pp. 30–38. (Rus)

5. *Yermolov I.N., Lange Yu.V.* Non-destructive testing: Reference. Vol. 3: Ultrasonic testing. – Moskva: Mashinostroenie, 2004. – 864 p. (Rus)

6. *Nozdrachova K.L., Suchkov G.M., Petrishchev O.N.* Excitation of ultrasonic pulses with a capacitive transducer // Naukovi Pratsi Donetskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu, serii «Obchysluvalna Tekhnika ta Avtomatyzatsiia». – 2015. – No 1 (28). – Pp. 165–171. (Rus)

7. *Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Nozdracheva Ye.L., Karpus V.V.* On ultrasonic wave excitation in metals by capacitive transducer // Tekhnicheskaiia diagnostika i nerazrushaiushchii kontrol. – 2015. – No 1. – Pp. 45–50. (Rus)

8. *Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Cherednichenko I.V., Fedorov V.V., Desyatnichenko A.V., Khashchina S.V., Maslova M.S.* Generator of Probing Pulses for EMA Flaw Detectors // Russian Journal of Nondestructive Testing. – New York, 2012. – Vol. 48. – No 9. – Pp. 537–540.

Надійшла 21.04.2016
Остаточний варіант 12.05.2016