

УДК 534.232.082.74

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТИПА

О.Н. Петрищев, г. Киев, НТУУ «КПИ»,
petrishev@kipeva.ntu-kpi.kiev.ua

Введение

Ультразвуковые преобразователи электромагнитного типа используются при решении практических задач вибродиагностики, структурного анализа материалов при их неразрушающем контроле [1, ..., 4], в составе первичных преобразователей в системах электрического измерения неэлектрических величин [5], а также в ультразвуковых приборах обработки и преобразования электрических сигналов. Алгоритмы функционирования устройств, предназначенных для решения перечисленных выше задач, достаточно часто предполагают процедуру изменения характеристик ультразвуковых преобразователей в течении рабочего цикла. Так, одной из центральных проблем вибродиагностики является селекция типов упругих волн и это означает, что в процессе измерения необходимо настраивать приемники упругих колебаний на прием продольных, крутильных и изгибных волн. При обработке электрических сигналов часто возникает необходимость в выполнении частотной фильтрации и это предполагает применение ультразвуковых преобразователей с перестраиваемыми частотными характеристиками. При измерениях параметров углового или линейного движения с помощью первичных ультразвуковых преобразователей возникает проблема определения направления движения контролируемого объекта. Для решения этой задачи требуются преобразователи с управляемым направлением излучения или приема упругих волн. По сути речь идет об управлении параметрами характеристики направленности ультразвукового преобразователя. Подобная ситуация управления характеристикой направленности приемника ультразвуковых волн возникает при определении координат источника шумов акустической эмиссии.

До недавних пор все проблемы, связанные с управляемым изменением параметров ультразвуковых преобразователей, решались путем одновременного использования нескольких преобразователей с различными характеристиками. В течении рабочего цикла ультразвукового прибора осуществлялось переключение с одного преобразователя на другой. Такой способ управляемого изменения характеристик преобразователя не всегда мог быть реализован технологически и не всегда доставлял достоверные результаты.

Если в устройствах, о которых шла выше речь, возможно применение ультразвуковых преобразователей электромагнитного типа, то возникает реальная и концептуально иная возможность создания управляемого преобразователя.

Базовая структура ультразвукового преобразователя электромагнитного типа состоит из источника (приемника) переменного магнитного поля, из источника постоянного магнитного поля подмагничивания и из некоторого объема металла, в котором, собственно, и происходит взаимная трансформация энергии переменного магнитного поля и напряженно-деформированного состояния упругой среды. Источники переменного и постоянного магнитных полей представляют собой, как правило, токопроводящие контуры. Коммутируя тем или иным способом соответствующие токовые структуры, можно существенно изменять характер постоянного и переменного магнитных полей и, стало быть, оказывать существенное воздействие на характеристики преобразователей электромагнитного типа как в режиме возбуждения, так и в режиме приема ультразвуковых волн.

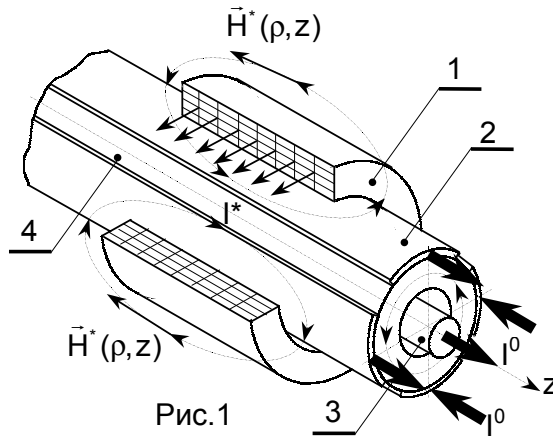
Таким образом, основная идея методов управления характеристиками ультразвуковых преобразователей электромагнитного типа заключается в электрической коммута-

ции электрических контуров в составе источников переменного и постоянного магнитных полей.

Рассмотрим некоторые примеры, которые доказывают реальность такого управления.

Перестраиваемый излучатель продольных, крутильных и изгибных волн в ферромагнитном стержне кругового поперечного сечения

На рис. 1 схематически показана конструкция ультразвукового преобразователя электромагнитного типа, в котором источником переменного магнитного поля служит катушка (позиция 1), а постоянное магнитное поле может создаваться либо соленоидом (он на рис. 1 не показан), который располагается соосно с полым ферромагнитным стержнем (позиция 4), либо током I^0 в проводнике на оси стержня (позиция 3) или в пластинах (позиция 2), расположенных на поверхности ферромагнитного стержня. В зависимости от того, по каким проводникам протекает постоянный ток I^0 , ультразвуковой преобразователь возбуждает в полем цилиндре либо продольные, либо крутильные, либо изгибные волны той или иной поляризации.



Режим излучения продольных волн

В том случае, когда участок ферромагнитного цилиндра 4 в ближайшей окрестности катушки 1 намагничен в аксиальном направлении постоянным магнитным полем $\vec{H}^0 \{0, 0, H_z^0\}$, которое создается с помощью большого (по сравнению с длиной катушки 1) соленоида, переменное магнитное поле катушки 1 создает в этом объеме деформации сжатия-растяжения. Разгрузка области нагружения осуществляется продольными осесимметричными волнами, которые уходят влево и вправо от области существования переменного магнитного поля. Если переменное магнитное поле $\vec{H}^*(\rho, z, t) = \vec{H}^*(\rho, z)e^{i\omega t}$, т. е. изменяется во времени по гармоническому закону и длина волны упругого возмущения намного превышает больший радиус (α_2) поперечного сечения стержня, то пространственно-развитая амплитуда $u_z(z)$ аксиальных смещений материальных частиц стержня за пределами области нагружения может быть определена [6, 7] следующими соотношениями

$$u_z(z) = \begin{cases} U_z^{(-)} e^{-i\gamma z}, & z > A, \\ U_z^{(+)} e^{i\gamma z}, & z < -A, \end{cases} \quad (1)$$

где $U_z^{(-)}$ и $U_z^{(+)}$ - амплитудные значения продольных волн, которые уходят влево (знак минус) и вправо (знак плюс) от источника переменного поля; $\gamma = \omega/v_{ст}$ - волновое число; ω - круговая частота; $v_{ст} = \sqrt{E^B/\rho_0}$ - стержневая скорость распространения продольных волн; ρ_0 - плотность ферромагнетика; $E^B = E + \Delta E$ - модуль Юнга намагниченного ферромагнетика; $\Delta E = \frac{m_1 m_{cp}}{E \mu_2} (H_z^0)^2$ - добавка к модулю Юнга (ΔE - эффект) за счет взаимодействия между магнитными доменами; m_1 , m_2 и m_{cp} - магнитоупругие константы,

причем $m_{cp} = m_1 - \lambda m_2 / (G + \lambda)$ - магнитоstrictionная константа для режима одноосного сжатия-растяжения стержня; λ и G - модули упругости (константы Ламе); μ_2^e - компонент тензора магнитной проницаемости в режиме постоянства деформаций; $\pm A$ - правая и левая условные ($A \sim 3\ell$) границы области существования переменного магнитного поля (ℓ - половина длины катушки).

Амплитуды $U_z^{(\pm)}$ линейно связаны с амплитудным значением I^* переменного тока в катушке 1 следующим образом

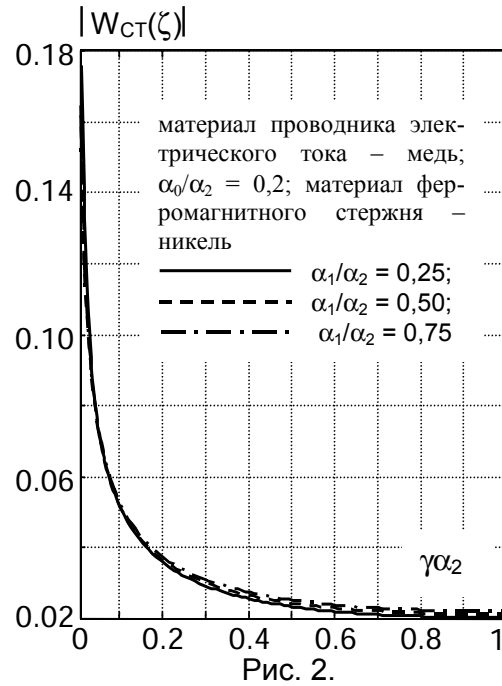
$$U_z^{(\pm)} = \mp I^* W_z^u(\gamma, P), \quad (2)$$

где $W_z^u(\gamma, P) = \frac{m_{cp} H_z^0 N}{4E^B} W_{yn}(\gamma)$; N - число витков катушки; $W_{yn}(\gamma) = W_k(\ell, R, \gamma) W_{ct}(\zeta)$ - частотная характеристика ультразвукового преобразователя в целом, причем $W_k(\ell, R, \gamma)$ и $W_{ct}(\zeta)$ частотные характеристики собственно источника переменного магнитного поля (катушки) и полого ферромагнитного стержня соответственно. Функция $W_k(\ell, R, \gamma)$ определяет влияние размеров катушки на эффективность возбуждения продольной волны на заданной частоте и рассчитывается по формуле

$$W_k(\ell, R, \gamma) = \frac{\sin \gamma \ell}{\gamma \ell} R(\gamma);$$

$$R(\gamma) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{(R_2 K L_2 - R_1 K L_1)}{(R_2 - R_1)},$$

где $KL_v = K_1(\gamma R_v) L_0(\gamma R_v) + K_0(\gamma R_v) L_1(\gamma R_v)$, $v = 1, 2$; R_2 и R_1 - наружный и внутренний радиусы поперечного сечения катушки; $K_n(\gamma R_v)$ и $L_n(\gamma R_v)$ - функция Макдональда и модифицированная функция Струве порядка $n = 0, 1$. Функция $W_{ct}(\zeta)$ определяется в результате решения граничной задачи электродинамики для многосвязной области, в которой имеются три цилиндрические границы раздела сред с различными проводимостями и магнитными проницаемостями. Это поверхность $\rho = \alpha_0$ проводника 3 (рис. 1) и две боковые поверхности ($\rho = \alpha_1$ и $\rho = \alpha_2$) полого ферромагнитного цилиндра. Для фурье-образов компонент вектора напряженности переменного магнитного поля катушки 1 эта граничная задача решается достаточно просто, и единственной проблемой являются громоздкие алгебраические конструкции. На рис. 2 показаны графики изменения модуля функции $W_{ct}(\zeta)$. Условия, при которых выполнялись расчеты, указаны на врезке в поле рисунка.



На рис. 3 показаны графики модуля $W_{yn}(\gamma)$ частотной характеристики ультразвукового преобразователя электромагнитного типа, который возбуждает продольные волны в токопроводящем ферромагнетике (никель) (рис. 3,а) и в ферродиелектрике (феррите) (рис. 3,б). В обоих случаях варьируемым параметром является магнитная проницаемость ферромагнетика. Расчеты проводились в предположении, что $\mu_2^e = \mu_3^e$. Отчетливо видно, что с ростом значений магнитной проницаемости происходит сужение полосы эффективно возбуждаемых частот. Это происходит потому, что ферромагнитный стержень шунти-

рует силовые линии магнитного поля катушки и с ростом магнитной проницаемости ма-

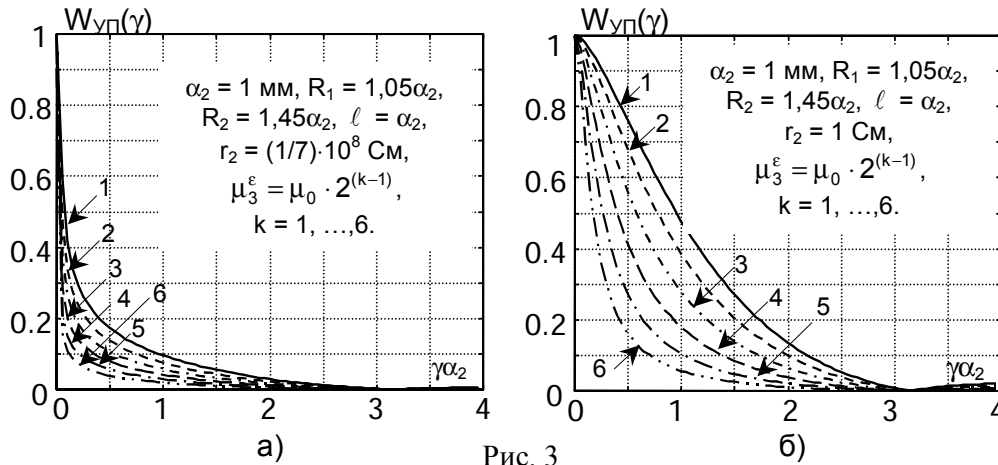


Рис. 3

териала стержня происходит увеличение длины магнитного следа катушки на стержне, т. е. происходит увеличение длины области нагружения ферромагнитного стержня переменным магнитным полем катушки. Если материал стержня проводит электрический ток, то магнитное поле катушки в ферромагнитном стержне «расползается» в еще большей степени. Длина области нагружения возрастает и, соответственно, сужается полоса частот, где происходит эффективное возбуждение ультразвуковых колебаний.

Из представленных на рис. 3 результатов можно сделать вывод, что данный излучатель плохо согласуется с приемником ультразвуковых волн электромагнитного типа. Действительно, ультразвуковой преобразователь электромагнитного типа, работающий в режиме приема ультразвуковых колебаний, вырабатывает на своем электрическом выходе сигнал, который прямо пропорционален скорости изменения магнитного потока через электрический контур приемника переменного магнитного поля. На нулевой частоте и в её ближайшей окрестности сигнал на выходе приемника практически равен нулю. В тоже время именно в этом частотном диапазоне происходит наиболее эффективное преобразование энергии в режиме излучения. Указанное противоречие снимается, если в качестве

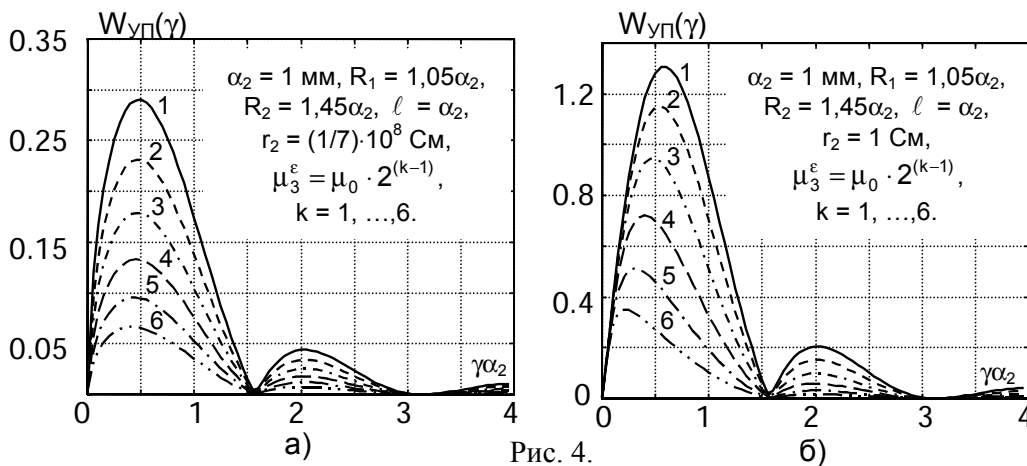


Рис. 4.

излучающего преобразователя используется не одна, а две одинаковых, но встречно включенные, катушки. При этом $U_z^{(\pm)} = -iI * W_z^u(\gamma, P)$, а частотная характеристика преобразователя определяется формулой $W_{yp}^{(2)}(\gamma) = 2 \sin\{2\gamma(\ell + d)\} W_{yp}(\gamma)$, где d – половина рас-

стояння между встречно включенными катушками. Графики модуля функции $W_{уп}^{(2)}(\gamma)$ показаны на рис. 4. При выполнении расчетов было принято $\ell = d = \alpha_2$. Очевидно, что расстояние между катушками можно изменять в широких пределах – от нуля до сколь угодно большой величины, оказывая тем самым существенное влияние на частотную характеристику ультразвукового преобразователя электромагнитного типа.

Если источник переменного магнитного поля состоит из трех одинаковых, эквиди-

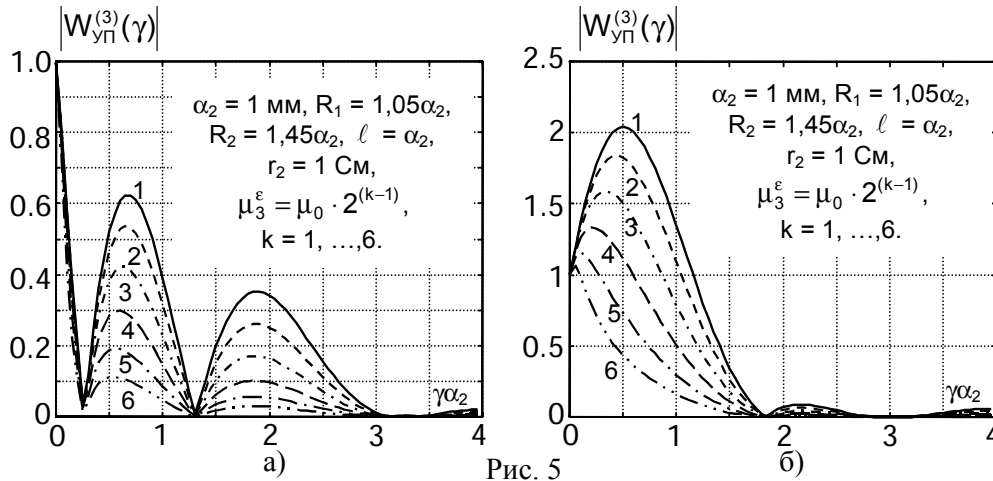


Рис. 5

стантно расположенных, катушек и протекающий по ним электрический ток имеет фазовый сдвиг $-\pi/2$, где n – порядковый номер катушки, то частотная характеристика ультразвукового преобразователя $W_{уп}^{(3)}(\pm\gamma) = \pm i [1 \pm 2 \sin\{2\gamma(\ell + d)\}] W_{уп}(\gamma)$, т. е. имеет различные значения для продольных волн уходящих в различные стороны от области нагружения. Модуль функции $W_{уп}^{(3)}(\pm\gamma)$ для волн, уходящих вправо и влево от катушки, графически представлен на рис. 5,а и рис. 5,б соответственно. На этих рисунках отчетливо видны области частот, где преобразователь электромагнитного типа возбуждает упругие волны, распространяющиеся преимущественно в одном направлении.

Таким образом, выполняя электрические коммутации контуров в источнике переменного магнитного поля, можно управлять не только границами рабочего диапазона частот, но и направленностью излучения ультразвукового преобразователя электромагнитного типа.

Режим возбуждения крутильных волн

Если по проводнику 3 (рис. 1) протекает постоянный электрический ток I^0 , то в объеме полого цилиндра 4 существует постоянное поле подмагничивания $H_3^0 = I^0 / (2\pi r)$, где r – текущее значение радиальной координаты, благодаря которому в области существования переменного магнитного поля катушки 1 развиваются скручивающие стержень деформации. Избыточная энергия из области нагружения уносится влево и вправо крутильными волнами. При этом амплитудное значение вектора смещения материальных частиц стержня за пределами области нагружения имеет всего лишь один окружной компонент $u_\theta(\rho, z)$, причем

$$u_\theta(\rho, z) = \begin{cases} \rho \Phi^{(-)} e^{-ik_s z}, & z > A, \\ \rho \Phi^{(+)} e^{ik_s z}, & z < -A, \end{cases} \quad (3)$$

где $\Phi^{(\pm)}$ - угол поворота поперечных сечений стержня; $k_s = \omega/v_s^B$; $v_s^B = \sqrt{[GJ_p]^P / (\rho_0 J_p)}$ - скорость волн чистого сдвига в намагниченном ферромагнитном стержне; J_p - полярный момент инерции поперечного сечения стержня; $[GJ_p]^P = GJ_p [1 + \Delta(GJ_p)]$ - жесткость на скручивание намагниченного стержня; $\Delta(GJ_p) = \frac{[(m_1 - m_2)l^0]^2 (\alpha_2^2 - \alpha_1^2)}{32\pi\mu_3^e GJ_p}$ - увеличение крутильной жесткости полого стержня при намагничивании; G - модуль сдвига. Угол поворота поперечных сечений, который обеспечивается показанным на рис.1 преобразователем, рассчитывается по формуле

$$\Phi^{(\pm)} = \mp \frac{(m_1 - m_2)l^0 * N}{4[GJ_p]^P} W_{уп}(k_s), \quad (4)$$

где $W_{уп}(k_s) = W_k(\ell, R, k_s) W_{ст}(\zeta)$ - частотная характеристика преобразователя, компоненты которой были определены в комментариях к формуле (2). Естественно, что частотная характеристика $W_{уп}(k_s)$ преобразователя в режиме возбуждения крутильных волн может видоизменяться в результате коммутации электрических контуров в составе источника переменного магнитного поля точно также как и рассмотренная ранее характеристика преобразователя в режиме возбуждения продольных волн.

Волны поперечного изгиба в ферромагнитном стержне возбуждаются переменным магнитным полем катушки в том случае, когда поле подмагничивания создается постоянным током, который протекает по одной из двух пар проводников 2, расположенных на поверхности полого цилиндра.

Таким образом, коммутируя электрические контуры в составе источника постоянного магнитного поля, можно управлять типом возбуждаемых упругих волн. Поскольку показанный на рис. 1 преобразователь электромагнитного типа является обратимым, постольку коммутация контуров источника постоянного поля позволяет осуществлять селекцию в режиме приема ультразвуковых волн.

Литература

1. Schlawne F., Graff A., Scheider H. Use of EMATs for Inspection of Tubes and Pipes // NDT.net. – 2003. – V.8.- №3.
2. Hutchins D.A., Hu J.K., Young R.P., Stoner R., Jansen D., Zhang Q.L. Ultrasonic tomography of metals using noncontact transduction // J. Acoust. Soc. Am. - 1989 – **85** - №2 – P. 747 – 752.
3. Ogi H., Ledbetter H., Kim S., Hirao M. Contactless mode-selective resonance spectroscopy: Electromagnetic acoustic resonance // J. Acoust. Soc. Am. - 1999 – **106** - №2 – P. 666 – 665.
4. Tian J., Ogi H., Tada T., Hirao M. Vibration analysis on electromagnetic-resonance-ultrasound microscopy (ERUM) for determining localized elastic constants of solids // J. Acoust. Soc. Am. - 2004 – **115** - №2 – P. 630 – 636.
5. Петрищев О. Н., Шпинь А. П. Ультразвуковые магнитострикционные волноводные системы. – Киев: Изд-во при Киевском ун-те, 1989. – 132 с.
6. Петрищев О.Н. Принципы расчета частотных характеристик ЭМА преобразователей в режиме возбуждения ультразвуковых колебаний // Акустический симпозиум «Консонанс - 2003». Сборник трудов. – Киев: НАН Украины. Институт гидромеханики. – 2003. – С. 195 – 201.
7. Петрищев О.Н. Математическая модель катушечного электроакустического преобразователя в режиме возбуждения продольных волн в ферромагнитном стержне // Электроника и связь, №25, 2005. С. 50 – 61.