P. V. Pashkov, G. A. Petrov, T. V. Samojlova

TESTING OF THE MULTILAYER CERAMIC CAPACITORS BY MEANS OF ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSDUCERS

Reliability is one of the main characteristics of the MLCC quality. All the modern developed methods of capacitor nondestructive testing, had one disadvantage: impossibility of fast and reliable testing strait into the production line. The following article describes new methodic of MLCC testing by means of electromagnetic-acoustic transducers. Described method base on the cooperation of the resonance properties of the defective and non-defective capacitors. By using introduced methodic it is able to provide on-line fast speed testing of produced components.

MLCC, ceramic capacitors, resonance method, electromagnetic-acoustic transducer

УДК 534.232

Б. Г. Степанов, А. В. Теплякова

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕРЖНЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ФАЗИРОВАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СЕКЦИЙ ПЬЕЗОСТЕРЖНЯ

Для стержневых гидроакустических преобразователей, пьезостержень которых разделен на части, возбуждаемые различными по амплитуде и фазе электрическими напряжениями, путем выбора критерия оптимизации показана возможность формирования широкополосных (до 2–3 октав) равномерных амплитудно-частотных и линейных фазочастотных характеристик излучения.

Стержневой преобразователь, широкополосность, частотная характеристика, оптимизация параметров

В работах [1] и [2] рассматривалась возможность управления амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) стержневых преобразователей, пьезостержень которых разделен на две части, возбуждаемые различными по амплитуде и фазе электрическими напряжениями $U_i = U_{im}\mathrm{e}^{j\varphi_i}$, где U_{im} и φ_i – амплитуда и фаза; $i = 1,\ 2$. В зависимости от поставленной задачи: компенсации тыльного излучения или формирования широкополосного равномерного излучения с линейной фазочастотной характеристикой (ФЧХ) в рабочей полосе частот, определялись необходимые для их реализации частотные зависимости отношения амплитуд U_{2m}/U_{1m} и разности фаз $\Delta\varphi_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$ электрических напряжений. При этом собственные значения амплитуд и фаз возбуждающих электрических напряжений зависят от выбора одного из них, принятого в качестве базового. В связи с этим определенный интерес вызывает поиск других возможных решений, а также обоснование достаточности выбора минимального числа частей (секций) пьезостержня, обеспечивающих заданные АЧХ и ФЧХ излучения. Задачу будем решать на базе расчетной модели (рис. 1) стержневого преобразователя в виде пьезостержня, электрически разделенного на n частей (секций), армированного стяжкой и нагруженного своими торцами на произвольные входные импедансы Z_V и Z_W. Предполагается, что каждая i-я секция пьезостержня содержит не менее двух параллельно включенных пьезокерамических шайб и возбуждается электрическим напряжением $U_i = U_{im}\mathrm{e}^{j\varphi_i}$.

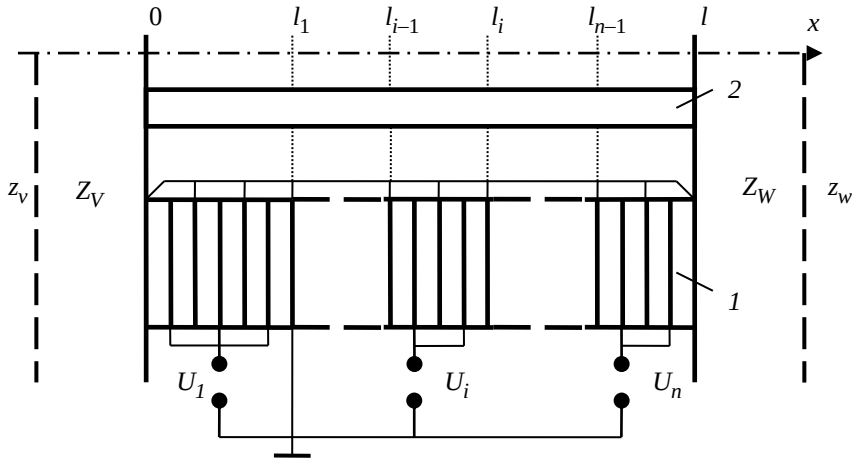

Рис. 1

В соответствии с результатами работы [2] выражения для амплитуд колебательных скоростей на торцах такого пьезостержня могут быть записаны в следующем виде:

$$\dot{\xi}(0)=\frac{N_T}{\Delta}\sum_{i=1}^{n}U_i\left[C_1\sin\alpha\psi+\gamma_0\frac{z_0}{z}C_4+\left(\gamma_0\frac{z_0}{z}\cos\alpha\psi-j\frac{Z_W}{zS}\sin\alpha\psi\right)C_3\right];$$

$$\dot{\xi}(l)=\frac{N_T}{\Delta}\sum_{i=1}^{n}U_i\left[C_2\sin\alpha\psi+\gamma_0\frac{z_0}{z}C_3+\left(\gamma_0\frac{z_0}{z}\cos\alpha\psi-j\frac{Z_V}{zS}\sin\alpha\psi\right)C_4\right],$$

где $\Delta=\dfrac{Z_V+Z_W}{zS}\left(\gamma_0\dfrac{z_0}{z}\sin\psi\cos\alpha\psi+\sin\alpha\psi\cos\psi\right)-j\left(1+\gamma_0^2\dfrac{z_0^2}{z^2}+\dfrac{Z_VZ_W}{z^2S^2}\right)\sin\alpha\psi\sin\psi-$

$-j2\gamma_0\dfrac{z_0}{z}(1-\cos\alpha\psi\cos\psi)$; $C_1=\cos(1-p_i)\psi-\cos(1-p_{i-1})\psi$; $C_2=\cos p_i\psi-\cos p_{i-1}\psi$;

$C_3=\sin(1-p_i)\psi-\sin(1-p_{i-1})\psi$; $C_4=\sin p_i\psi-\sin p_{i-1}\psi$; $\psi=kl$ ($k=\omega/c$; ω – круговая частота; l – длина пьезостержня); $\alpha=c/c_0$; c_0, z_0, S_0 и c, z, S – скорость звука, удельный импеданс и площадь поперечного сечения армирующей стяжки и пьезостержня; $\gamma_0=S_0/S$; $N_T=d_{33}/ztS_{33}^E$ (d_{33} – пьезомодуль; S_{33}^E – упругая податливость; t – межэлектродное расстояние); $p_i=l_i/l$; $p_0=0$; $p_n=1$; n – число пьезосекций. Колебательные скорости излучающих торцов преобразователя $\dot{\xi}_V(\psi)$ и $\dot{\xi}_W(\psi)$ представим в виде

$$\dot{\xi}_V(\psi)=K_V\cdot\dot{\xi}(0)=N_0\cdot F_V(\psi);\qquad \dot{\xi}_W(\psi)=K_W\cdot\dot{\xi}(l)=N_0\cdot F_W(\psi),$$

где K_V и K_W – коэффициенты передачи по колебательной скорости через структуры с входными импедансами Z_V и Z_W [3]; $F_V(\psi)=F_{Vm}(\psi)e^{j\varphi_V(\psi)}$; $F_W(\psi)=F_{Wm}(\psi)e^{j\varphi_W(\psi)}$. При решении задач синтеза конкретное задание комплексных функций $F_V(\psi)$ и $F_W(\psi)$ по сути дела определяет АЧХ и ФЧХ преобразователя при излучении им соответствующими торцами и, в зависимости от поставленной задачи, позволяет определить необходимые для этого соотношения между возбуждающими электрическими напряжениями U_i.

В общем случае, определение необходимых АЧХ и ФЧХ излучения, а также частотных зависимостей амплитуд U_{im} и фаз φ_i возбуждающих электрических напряжений является задачей многопараметровой оптимизации, когда для заданной геометрии преобразователя на каждом шаге изменения частоты определяются значения амплитуды и фазы возбуждающих электрических напряжений, которые обеспечивают минимальное различие между требуемой и получаемой АЧХ и ФЧХ излучения. Данная задача может иметь много решений и достаточно сильный разброс значений оптимизируемых параметров, поэтому необходимо ввести дополнительные условия, обеспечивающие, в частности, отсутствие резких скачков изменения фазы для каждого электрического напряжения $U_i = U_{im} \mathrm{e}^{j\varphi_i}$, возбуждающего секцию при переходе от одной частоты к другой, а также разумное ограничение между максимальными и минимальными значениями амплитуд этих напряжений.

При проведении расчетов основной рабочий диапазон частот преобразователя разбивался на N_q поддиапазонов по n_q точек в каждом. Для повышения точности расчетов и последующей возможности более плавного построения результирующих частотных характеристик поддиапазоны выбирались с перекрытием (рис. 2) таким образом, чтобы начало следующего поддиапазона располагалось в середине предыдущего.

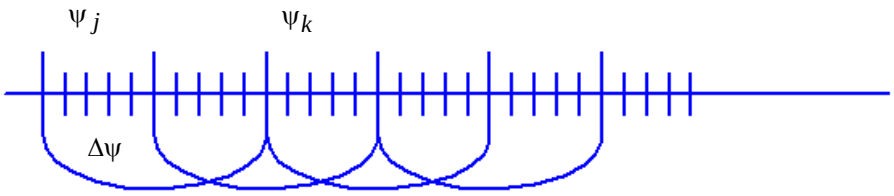

Рис. 2

Суть решения поставленной задачи заключается в следующем. В рабочем диапазоне частот преобразователя, который определяется выбором основных его параметров n, p_i, $\psi_{rv,w} = a_{rv,w}\psi$, $z_{rv,w}$, $\gamma_{V,W} = S_{V,W}/S$, $Q_{rv,w}$, γ_0 и т. д., задается вид АЧХ и ФЧХ излучения (по колебательной скорости $\dot{\xi}_V(\psi)$). Здесь $\psi_{rv,w}$, $z_{rv,w}$ и $Q_{rv,w}$ – волновая длина, удельный импеданс и механическая добротность пассивных слоев; $\gamma_{V,W}$ – коэффициенты трансформации площади поперечного сечения; $r = 1,\ 2, \ldots$. В каждом поддиапазоне частот в соответствии с выбранным критерием оптимизации определяются амплитуды и фазы возбуждающих электрических напряжений, а также получающиеся значения АЧХ и ФЧХ колебательной скорости $\dot{\xi}_V^{\mathrm{opt}}(\psi)$, максимально приближенные к задаваемым величинам. При этом определяются средние по поддиапазону значения указанных величин, по которым строятся с помощью «сплайн-интерполяции» соответствующие частотные зависимости.

Математически выбранный критерий по оптимизации решения рассматриваемой задачи можно записать в следующем виде:

$$\mathrm{Krit}(\psi) = \sqrt{\frac{\sum_{\psi=\psi_j}^{\psi_k}\left[\mathrm{Re}(\dot{\xi}_V^{\mathrm{tr}}(\psi)) - \mathrm{Re}(\dot{\xi}_V^{\mathrm{opt}}(\psi))\right]^2}{2\Delta\psi}} +$$

$$+\sqrt{\frac{\sum_{\psi=\psi_j}^{\psi_k}\left[\mathrm{Im}(\dot{\xi}_V^{\mathrm{tr}}(\psi)) - \mathrm{Im}(\dot{\xi}_V^{\mathrm{opt}}(\psi))\right]^2}{2\Delta\psi}} + K_1\left(\sum_{i=1}^{n}\left|U_i(\psi_q)\right|\right)^{K_3} +$$

$$+K_2\sum_{i=1}^{n}\arccos\left\{\frac{\mathrm{Re}(U_i(\psi_q))\ \mathrm{Re}(U_i(\psi_{q-1})) + \mathrm{Im}(U_i(\psi_q))\ \mathrm{Im}(U_i(\psi_{q-1}))}{\left|U_i(\psi_q)\right|\left|U_i(\psi_{q-1})\right|}\right\}, \qquad (1)$$

где $\dot{\xi}_V^{\mathrm{tr}}(\psi)$ – колебательная скорость во фронтальном направлении, определяющая требуемую АЧХ и ФЧХ излучения в заданной точке $\psi = \psi_q$ частотного поддиапазона; $\dot{\xi}_V^{\mathrm{opt}}(\psi)$ – колебательная скорость во фронтальном направлении, которую необходимо получить в заданной точке $\psi = \psi_q$ частотного поддиапазона; $U_i(\psi_q)$ – электрическое напряжение, подаваемое на секцию с номером i; $U_i(\psi_{q-1})$ – электрическое напряжение, определенное для предыдущей точки частотного поддиапазона; K_1, K_2 и K_3 – множители и показатель степени, определяемые для каждого варианта построения преобразователя; $\Delta\psi$ – длина частотного поддиапазона, в котором происходит оптимизация; ψ_j и ψ_k – начальная и конечная частоты поддиапазона; n – число пьезосекций.

В выражении (1) два первых слагаемых определяют поиск минимума разности между требуемыми и получаемыми значениями АЧХ и ФЧХ излучения во фронтальном направлении в пределах каждого частотного поддиапазона $\Delta\psi$. Длина поддиапазонов $\Delta\psi$ выбирается из условия получения достаточной точности при оцифровке напряжения. Суммирование в первых двух слагаемых в (1) происходит по числу точек n_q в пределах выбранного поддиапазона. В каждом поддиапазоне определяются средние значения амплитуд U_{im} и фаз φ_i возбуждающих электрических напряжений, подаваемых на секции пьезостержня. Третье слагаемое в выражении (1) определяет условие ограничения максимума рассчитываемых амплитуд U_{im} электрических напряжений. Четвертое слагаемое – это минимизация скачков изменения фазы при переходе от одного частотного поддиапазона к другому. Данное условие определяется как скалярное произведение векторов средних комплексных значений электрических напряжений в данном и предыдущем поддиапазонах. Множители K_1 и K_2 для 3-го и 4-го слагаемых необходимы для корректирования «веса» слагаемых в общей сумме (1) и равномерного вклада всех четырех слагаемых в итоговую сумму, определяющую критерий оптимизации (1). Показатель степени K_3 влияет на скорость изменения 3-го слагаемого и тем самым также выполняет роль корректирующего коэффициента. В итоге, выполняя все условия нахождения минимумов для каждого поддиапазона частот, определя-

ется одно среднее значение для амплитуд U_{im} и фаз φ_i возбуждающих электрических напряжений. Решение задачи выполнялось с использованием пакета MatLab.

В качестве примера действия разработанных программ по оптимизации на рис. 3 приведены результаты расчета для односторонне нагруженного преобразователя, содержащего пьезостержень с двумя секциями и один согласующий слой. Параметры преобразователя, принятые при выполнении расчетов, были следующие: $z_v = 1.5 \cdot 10^6$ Па · с/м; $z_w = 0$; $z = 25 \cdot 10^6$ Па · с/м; $p_1 = p = 0.5$; $\gamma_0 = 0$; $\gamma_V = \gamma_W = 1$; $a_{1v} = 0.5$; $z_{1v} = 5 \cdot 10^6$ Па · с/м; $Q = 100$; $Q_{1v} = 100$; $a_{rw} = 0$.

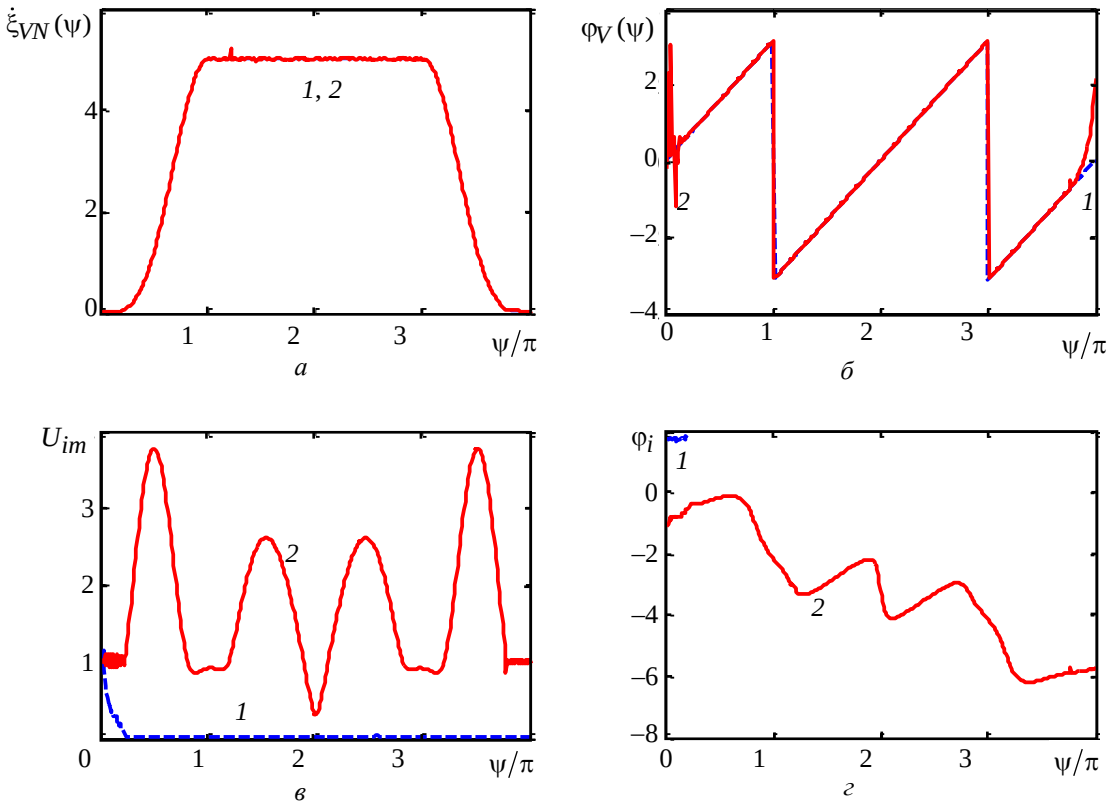

Рис. 3

Подобно случаю, рассмотренному в [2], при решении задачи синтеза АЧХ и ФЧХ излучения задавались в виде $F_{Vm}(\psi) = V \sin^4(0.5\psi)$, при $\psi \le \pi$ и $\psi \ge 3\pi$, и $F_{Vm}(\psi) = V = \text{const}$, при $\psi \in [\pi,\ 3\pi]$; $\varphi_V(\psi) = \psi$. Корректирующие коэффициенты в критерии оптимизации в данном случае имели следующие значения: $K_1 = 2 \cdot 10^{-4}$, $K_2 = 0.05$, $K_3 = 3$; число поддиапазонов $N_q = 20$ по $n_q = 20$ точек. Как видно, приведенные на рис. 3, *а* и б задаваемые и рассчитанные АЧХ и ФЧХ излучения практически совпадают. На рис. 3, *в* и *г* приведены частотные зависимости амплитуд U_{im} и фаз φ_i возбуждающих электрических напряжений, обеспечивающие реализацию указанных ранее АЧХ и ФЧХ излучения. Интересно отметить, что для данного варианта возбуждения электрическое напряжение подается только на вторую секцию (кривые *2*), а на первую секцию (кривые *1*) не подается ($U_{1m} = 0$). При нулевом значении электрического напряжения на первой секции его фаза не определяется. При выборе других значений масштабных множителей в критерии оптимизации решение для частотных зависимостей амплитуд U_{im} и фаз

φ_i возбуждающих электрических напряжений получается иным. Так, на рис. 4 показан вариант решения задачи оптимизации для значений $K_1 = 1 \cdot 10^{-4}$, $K_2 = 0.01$, $K_3 = 3$. Структурные параметры преобразователя для этого варианта выбраны теми же, что и для рис. 3. Уменьшение значений коэффициентов K_1 и K_2 приводит, соответственно, к уменьшению влияния третьего и четвертого слагаемых в критерии оптимизации (1) и появлению частотных зависимостей для амплитуды U_{1m} и фазы φ_1 электрического напряжения, подаваемого на первую секцию пьезостержня. Как видно, в приведенных примерах расчетов наблюдается достаточно хорошее совпадение задаваемых и рассчитанных АЧХ и ФЧХ излучения.

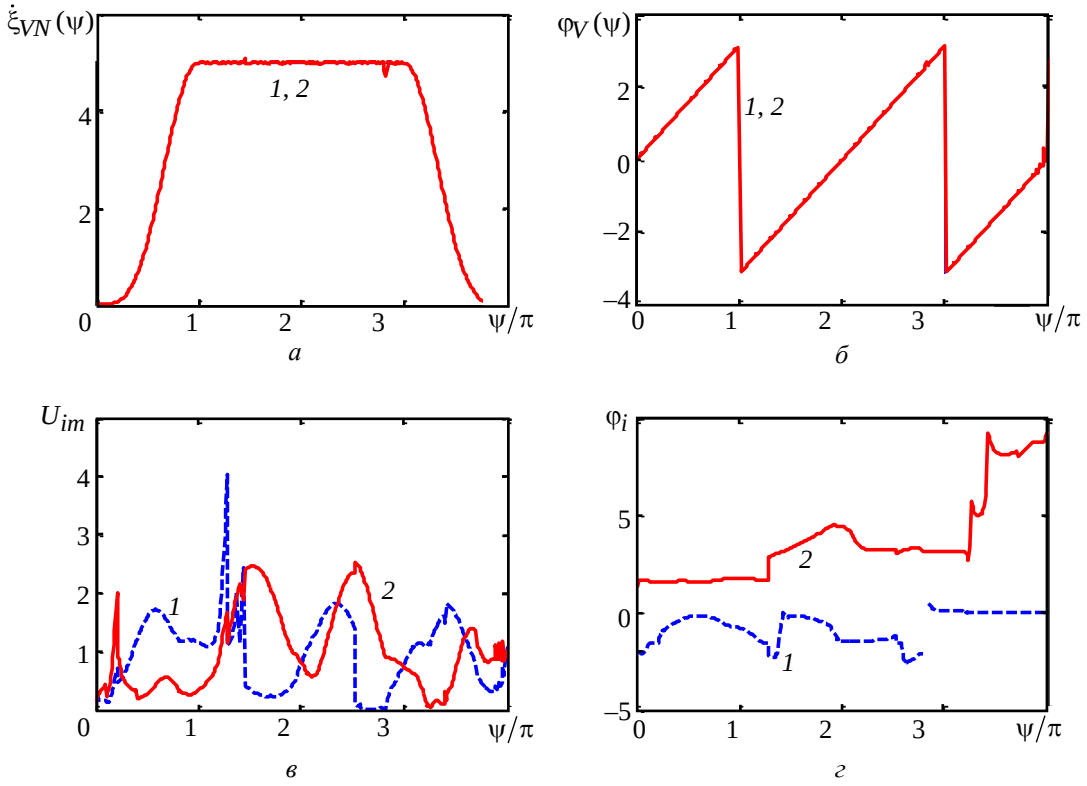

Рис. 4

Путем выбора корректирующих коэффициентов удается получить частотные зависимости для амплитуд и фаз U_1 и U_2 возбуждающих напряжений, приближенных к тем, которые определяются в задаче синтеза [2] как отношение $U_2/U_1 = U_{21}e^{j\Delta\varphi_{21}}$. В данном случае U_1 является опорным напряжением, для которого можно положить $U_{1m}(\psi) = \text{const}$ и $\varphi_1(\psi) = 0$, т. е. не зависящим от частоты (волнового размера ψ). Тогда получим, что $|U_2/U_1| = U_{21} \sim U_{2m}$ и $\Delta\varphi_{21} = \varphi_2$ будут описывать частотные зависимости амплитуды и фазы электрического напряжения U_2 относительно напряжения U_1. Для условных значений $U_{1m} = 1$ и $\varphi_1(\psi) = 0$ на рис. 5 приведены частотные зависимости амплитуд и фаз U_1 и U_2, пределенных в соответствии с решением, использующим критерий оптимизации (1) – кривые *1* и *2*, а также частотные зависимости отношения амплитуд U_{21} и разности фаз

$\Delta\varphi_{21}$, найденных по формулам работы [2] – кривые *3*. Структурные параметры преобразователя для обоих вариантов расчета, а также вариант задания АЧХ и ФЧХ излучения выбраны теми же, что и для рис. 3. Для варианта решения задачи оптимизации были выбраны следующие значения корректирующих коэффициентов: $K_1 = 0$, $K_2 = 0$, $K_3 = 0$. Как видно, использование двух разных подходов к решению задачи синтеза дают качественно близкие результаты.

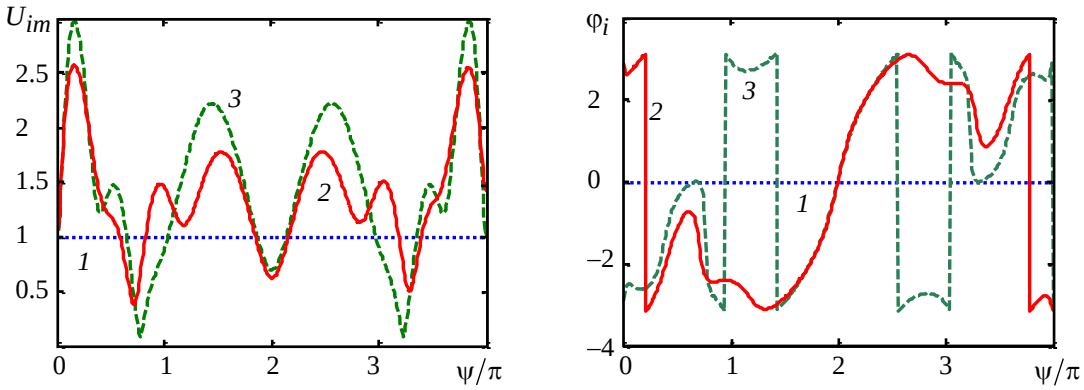

Рис. 5

На рис. 6 приведены результаты расчетов заданных (кривые *1*) и рассчитанных (кривые *2*) АЧХ и ФЧХ излучения, а также частотные зависимости амплитуд U_{im} и фаз φ_i возбуждающих электрических напряжений для преобразователя, пьезостержень которого состоит из четырех равных по длине секций ($n = 4$; $p_1 = 0.25$; $p_2 = 0.5$; $p_3 = 0.75$). Структурные параметры преобразователя выбраны теми же, что и для рис. 3. Для данного варианта построения пьезостержня корректирующие коэффициенты в критерии оптимизации (1) были выбраны следующими: $K_1 = 2 \cdot 10^{-10}$, $K_2 = 0$, $K_3 = 6$. Номера кривых на рис. 6, *в* и *г* соответствуют номерам секций пьезостержня, которые начинают свой отсчет от фронтальных слоев (накладок) преобразователя с входным импедансом Z_V (см. рис. 1). Как видно, увеличение числа индивидуально возбуждаемых секций пьезостержня привело к увеличению различия между амплитудами U_{im} и фазами φ_i электрических напряжений, а также меньшей степени приближения заданных и рассчитанных АЧХ и ФЧХ излучения. Таким образом, для рассмотренного диапазона частот $\psi \in [0;\ 4\pi]$, в котором формируется полоса пропускания порядка двух октав, как показывают представленные примеры расчетов, нецелесообразно увеличивать число индивидуально возбуждаемых секций пьезостержня и усложнять необходимую для этого систему возбуждения.

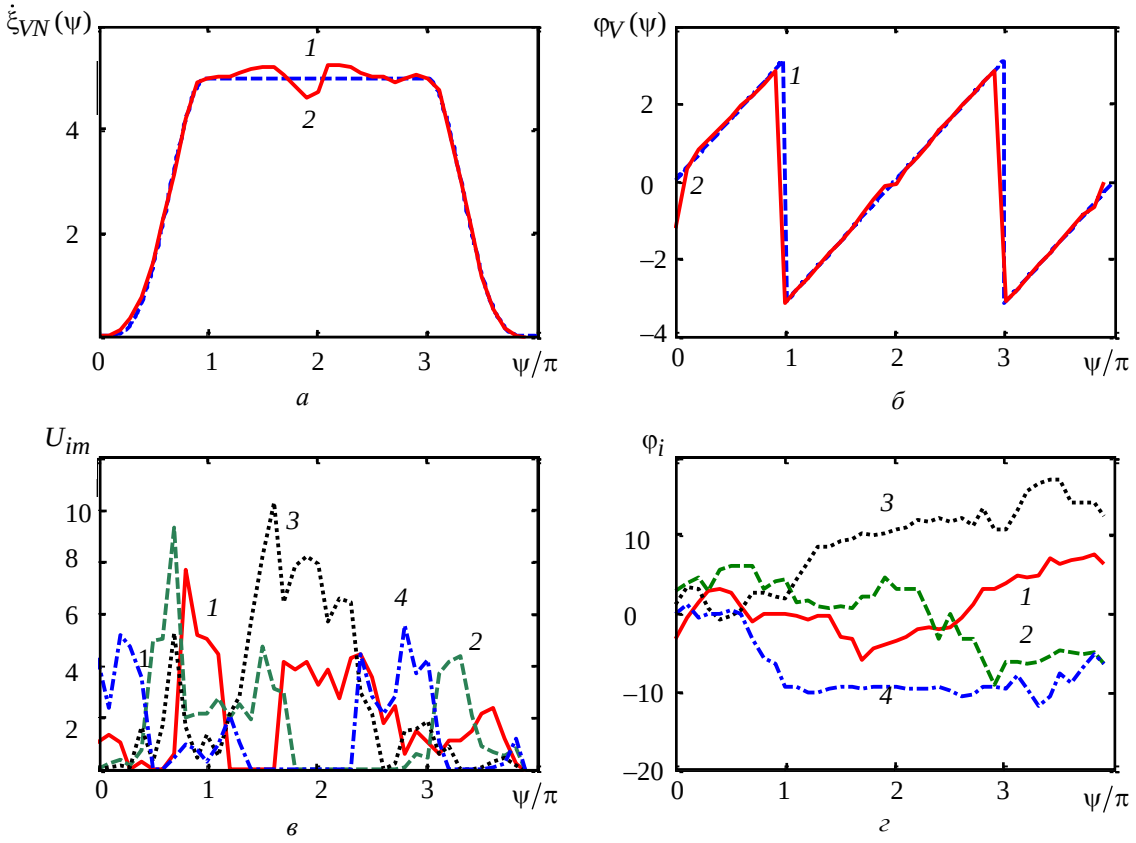

Рис. 6

Рассмотрим возможность увеличения рабочего диапазона частот ($\psi \in [0; 7\pi]$) и полосы пропускания до трех октав для исследуемой модели преобразователя путем увеличения числа независимо возбуждаемых секций пьезостержня. В качестве примера на рис. 7 приведены результаты расчетов для преобразователя, содержащего пьезостержень, электрически разделенный на четыре равные секции и один фронтальный слой. Значения параметров, принятые при выполнении расчетов, были следующие: $z_v = 1.5 \cdot 10^6$ Па с/м; $z_w = 0$; $z = 25 \cdot 10^6$ Па · с/м; $p_1 = 0.25$; $p_2 = 0.5$; $p_3 = 0.75$; $p_4 = 1$; $\gamma_0 = 0$; $\gamma_V = \gamma_W = 1$; $a_{1v} = 0.25$; $z_{1v} = 5 \cdot 10^6$ Па · с/м; $Q = 100$; $Q_{1v} = 100$; $a_{rw} = 0$.

Масштабные множители в критерии оптимизации в данном случае имели следующие значения: $K_1 = 4 \cdot 10^{-8}$, $K_2 = 2$, $K_3 = 6$; число поддиапазонов $N_q = 40$ по $n_q = 20$ точек. На рис. 7, *а* и *б* показаны результаты расчетов АЧХ и ФЧХ излучения соответственно заданных (кривые *1*) и рассчитанных (кривые *2*) значений с использованием критерия (1). На рис.7, *в* и *г* приведены также частотные зависимости амплитуд U_{im} и фаз φ_i возбуждающих электрических напряжений, обеспечивающих получение АЧХ и ФЧХ излучения (кривые *2*). Нумерация кривых на рис. 7, *в* и *г* соответствует номерам секций пьезостержня, отсчитываемых от фронтального слоя.

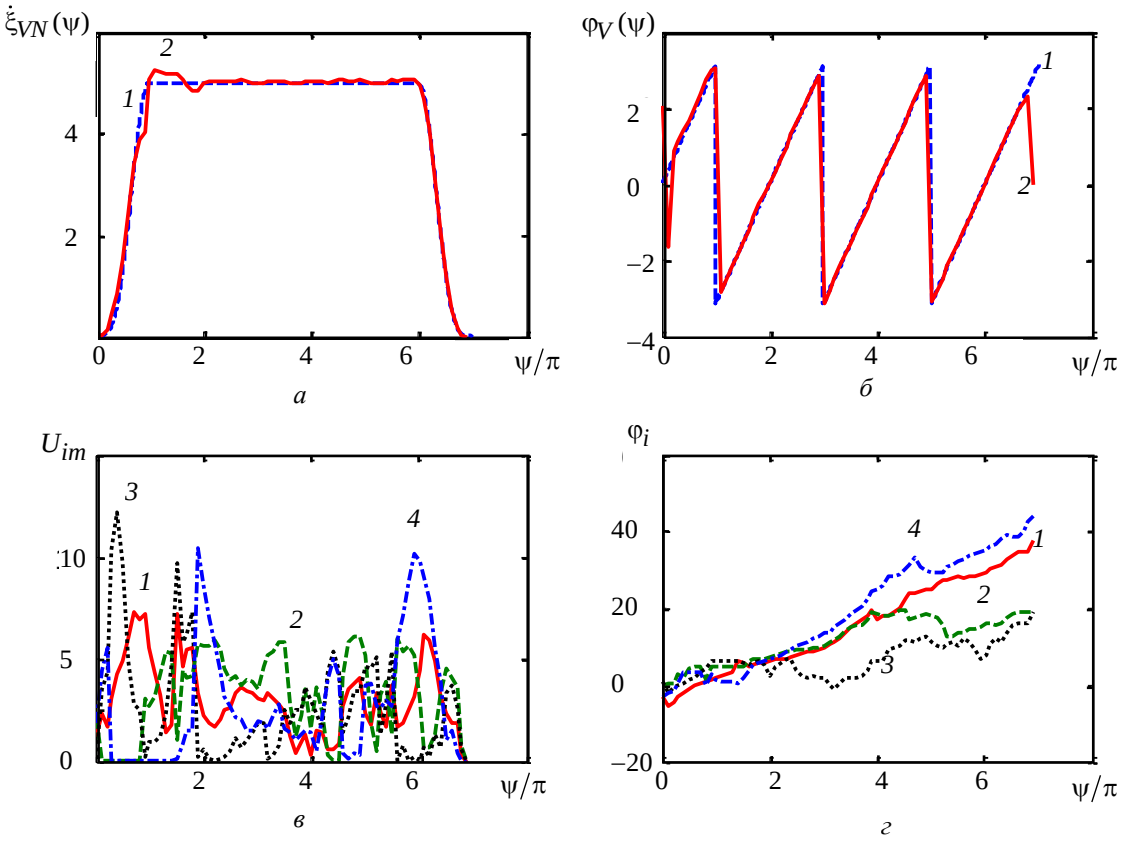

Рис. 7

В результате решения задачи оптимизации получено достаточно хорошее соответствие заданным и рассчитанным АЧХ и ФЧХ излучения. Однако при этом получается сравнительно сильная неравномерность частотных зависимостей амплитуд U_{im} возбуждающих секции пьезостержня электрических напряжений, особенно заметная для удаленных от излучающего торца преобразователя секций. Что касается фаз φ_i возбуждающих электрических напряжений, то характер их изменения более монотонный, определяемый ростом их значений с увеличением частоты. Как следует из серии многочисленных расчетов и некоторых приведенных в данной статье их результатов, увеличение числа секций пьезостержня ($n \geq 2$) с их фазированным возбуждением целесообразно при расширении полосы рабочих частот преобразователя свыше двух октав. Влияние армирующей стяжки как механически параллельного пьезостержню элемента в колебательной системе преобразователя в целом негативно сказывается на его полосе пропускания. Однако ряд технических решений (введение дополнительных связей между пьезостержнем и армирующей стяжкой в ряде их поперечных сечений [4], увеличение собственной гибкости армирующей стяжки [5], индивидуальное армирование секций (пьезоблоков) и т. п.) позволяют устранить проявления резонансных свойств армирующей стяжки из рабочего диапазона частот преобразователя с фазированным возбуждением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов Б. Г. О возможности управления частотными характеристиками и направленными свойствами стержневых преобразователей с помощью фазированного возбуждения // Акустика океана: докл. XII науч. школы-семинара им. акад. Л. М. Бреховских (XXI сессия РАО), Москва, 02–05.06.2009. М., 2009. С. 403–406.

2. Степанов Б. Г. О возможности построения широкополосных стержневых пьезопреобразователей с фазированным возбуждением секций // Акуст. журн. 2009. Т. 55, № 3. С. 407–414.

3. Дианов Д. Б., Кузнецов В. М. Влияние переходных слоёв на частотные характеристики стержневых пьезопреобразователей // Изв. ЛЭТИ. 1968. Вып. 63. С. 60–78.
4. А. с. № 1308162. Стержневой электроакустический преобразователь / А. М. Брук, Д. Б. Дианов, Б. Г. Степанов. 1987. Бюл. изобр. № 16.
5. А. с. № 1115245. Электроакустический преобразователь. / Г. А. Михайлов, А. С. Мудрецов, А. А. Шабров. 1984. Бюл. изобр. № 35.

B. G. Stepanov, A. V. Teplyakova

TO A QUESTION ABOUT OPTIMIZATION OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF ROD TRANSDUCERS WITH THE PHASED EXCITATION OF SECTIONSOF THE PIEZOROD

For the underwater rod transducers, the piezorod of which is divided into parts raised various on amplitude and a phase by electric voltages, by a choice of criterion of optimization possibility of formation broadband (up to 2 - 3 octaves) uniform amplitude-frequency and linear phase frequency characteristics of radiation is shown.

Underwater rodtransducer, wideband, frequency characteristics, optimization of parametres