



УДК 534.232

Б. Г. Степанов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## Синтез частотных характеристик широкополосных пластинчатых пьезопреобразователей путем фазирования их толщинных колебаний

*Рассматриваются результаты расчетов частотных характеристик, полученных при решении задачи синтеза для ультразвуковых преобразователей, содержащих две пьезопластины разделенные между собой пассивным слоем и возбуждаемые различными по амплитуде и фазе электрическими напряжениями. С помощью выбора последних показана возможность расширения полосы пропускания до 2...4 октав при условии обеспечения равномерных амплитудно-частотных и линейных фазочастотных характеристик излучения. Анализируется влияние на эти характеристики конструктивных параметров преобразователей.*

### Широкополосность, ультразвуковой преобразователь, синтез частотных характеристик, фазированное возбуждение

Методам расширения полосы пропускания пьезоэлектрических преобразователей (ПП) и связанным с этим задачам получения коротких акустических сигналов посвящено достаточно большое число работ отечественных и зарубежных авторов. Многие пути решения задач такого рода традиционны: использование механического демпфирования, акустических согласующих структур, электрических корректирующих цепей и т. п. [1]–[7]; другие носят более специфический характер: использование ПП с неоднородным электрическим полем или неоднородной поляризацией, пластин переменной толщины и т. д. [3], [5]. Ряд решений сопряжен с рассмотрением сугубо импульсного режима работы ПП, а также возбуждения их электрическими сигналами сложной формы, обеспечивающими компенсацию свободных колебаний ПП [8], [9]. Несмотря на различие подходов, их, как правило, объединяет одно – стремление сформировать по возможности более короткие акустические сигналы и приблизить работу ПП, как передаточного звена, к работе устройства, обеспечивающего неискаженную передачу воздействующего сигнала, что в частотной области реали-

зуется устройством типа идеального фильтра, имеющим равномерную амплитудно-частотную (АЧХ) и линейную фазочастотную (ФЧХ) характеристики.

Рассмотрим вариант построения ПП, обладающего такими характеристиками, а также способ его возбуждения. На рис. 1 приведена расчетная модель ПП, состоящего из двух пьезопластин 1 и 2, разделенных диэлектрическим пассивным слоем 3 и возбуждаемых двумя электрическими напряжениями  $U_1 = U_{1m}(\omega)e^{j\varphi_1(\omega)}$  и  $U_2 = U_{2m}(\omega)e^{j\varphi_2(\omega)}$ , где  $U_{1m}(\omega)$  и  $U_{2m}(\omega)$  – амплитуды;  $\varphi_1(\omega)$  и  $\varphi_2(\omega)$  – фазы, в общем случае зависящие от частоты  $\omega$ . Внешние поверхности пьезопластин нагружены на структуры с входными импедансами  $Z_V$  и  $Z_W$ , контактирующие с полубезграничными средами с удельными импедансами  $z_V$  и  $z_W$  соответственно. Пассивный слой 3, с одной стороны, позволяет, при необходимости, учесть толщину склеивающей пьезопластины прослойки, а с другой – влиять на амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики ПП, являясь дополнительным элементом управления.



$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\Delta F_V^*(\psi) + jN_1(\psi)K_V/p_1}{jN_2(\psi)K_V/(1-p_2)} = U_{21}(\psi)e^{j\Delta\varphi_{21}(\psi)}, \quad (2)$$

где в общем случае  $U_{21}(\psi) = U_{2m}(\psi)/U_{1m}(\psi)$  и  $\Delta\varphi_{21}(\psi) = \varphi_2(\psi) - \varphi_1(\psi)$ . Выражение (2) позволяет однозначно определить соотношение между амплитудами и фазами возбуждающих электрических напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , необходимое для реализации заданных АЧХ и ФЧХ излучения рассматриваемого ПП. В данном случае электрическое напряжение  $U_1$  можно считать опорным, полагая, в частности, что  $U_1 = U_{1m} = \text{const}$  и  $\varphi_1 = 0$  во всем рабочем диапазоне частот ПП. Тогда электрическое напряжение  $U_2$  будет корректирующим, а частотные зависимости его модуля и фазы будут соответствовать аналогичным зависимостям отношения  $U_2/U_1$ . Задание частотных зависимостей модуля  $F_V(\psi)$  и аргумента  $\varphi_V(\psi)$  комплексной функции  $F_V^*(\psi)$  фактически будет соответствовать заданию требуемых АЧХ и ФЧХ излучения рассматриваемого ПП. Рассмотрим последовательно основные результаты численного решения задачи синтеза, полагая, что  $F_V(\psi) = \text{const}$  во всем исследуемом диапазоне частот  $\psi$ , а  $\varphi_V(\psi)$  задается в виде линейно изменяющейся функции (подобно случаю идеального фильтра).

Поскольку поперечные размеры пьезокерамических пластин, как правило, в несколько раз превышают длину звуковой волны в среде ее распространения, то в данной работе ограничимся рассмотрением случая чисто активной нагрузки на полубезграничные среды с удельными импе-

дансами  $z_v$  и  $z_w$  соответственно. Тогда анализ АЧХ излучения можно проводить по АЧХ колебательной скорости в приближении излучения квазиплоских волн. Следует отметить, что рассматриваемый принцип построения и возбуждения ПП позволяет учесть влияние частотной зависимости активной и реактивной составляющих сопротивления излучения и при необходимости – скомпенсировать ее. Будем рассматривать нормированные АЧХ:  $\dot{\xi}_{VN}(\psi) = |\dot{\xi}_V(\psi)|/|\dot{\xi}_{V\text{max}}(\psi_0)|$  или  $F_{VN}(\psi) = F_V(\psi)N_T/|\dot{\xi}_{V\text{max}}(\psi_0)|$ , где  $|\dot{\xi}_{V\text{max}}(\psi_0)|$  – максимальное значение амплитуды колебательной скорости на резонансной частоте  $\psi = \psi_0 = \pi$  ( $\beta = 0$ ) для синфазно возбуждаемого ПП ( $U_{21}(\psi) = 1$  и  $\Delta\varphi_{21}(\psi) = 0$ ), содержащего только две пьезопластины 1 и 2 без пассивных элементов и односторонне нагруженного на воду ( $z_v = 1.5 \cdot 10^6$  Па·с/м;  $z_w = 0$ ;  $z = 30 \cdot 10^6$  Па·с/м;  $p_1 = p_2 = p = 0.5$ ;  $a_{qv} = a_{qw} = 0$ ). Отметим, что принятое значение нормировки численно совпадает со значением амплитуды колебательной скорости обычной пьезопластины толщиной  $d$  при прочих равных условиях. Ширина полосы пропускания на уровне  $-3$  дБ для этого случая составляет  $\Delta f/f_{\text{cp}} \approx 4\%$ . Для удобства оценки используемых в дальнейшем значений  $F_{VN}(\psi)$  отметим, что для ПП, нагруженного на воду и состоящего из пьезопластины с демпфером, имеющим удельный импеданс  $z_d = z_w = (5...20)10^6$  Па·с/м, нормированный уровень излучения и ширина полосы пропускания соответственно составят:  $F_{VN}(\psi) \approx 0.24...0.07$  и  $\Delta f/f_{\text{cp}} \approx 20...80\%$ .

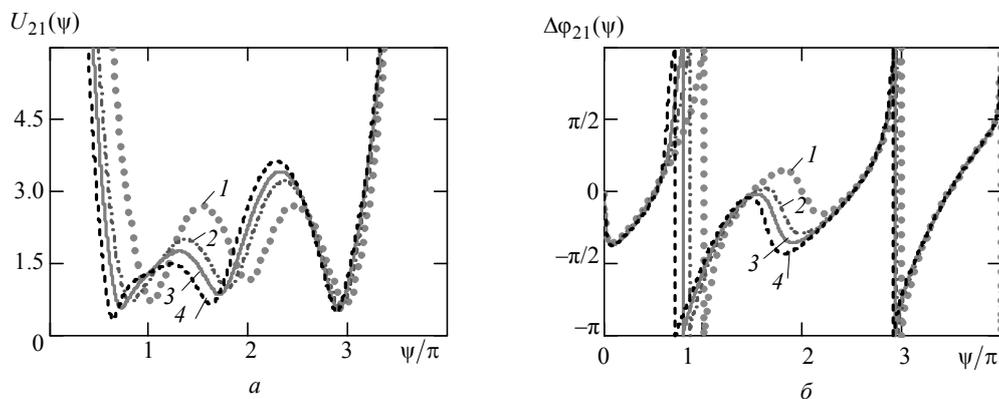


Рис. 2

В качестве примера на рис. 2 для указанных ранее в скобках параметров рассматриваемой модели ПП и значений  $F_{VN}(\psi) = 0.2$  и  $\varphi_V(\psi) = \psi$ , приведены частотные зависимости отношения амплитуд  $U_{21}(\psi)$  (рис. 2, а) и разности фаз  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$  (рис. 2, б) возбуждающих электрических напряжений для ряда значений параметра  $\beta$ . Номера кривых здесь соответствуют: 1 –  $\beta = 0$ ; 2 –  $\beta = 0.3$ ; 3 –  $\beta = 0.4$ ; 4 –  $\beta = 0.5$ .

При  $\beta = 0$  и  $p_1 = p_2 = p = 0.5$  частотные зависимости отношения амплитуд  $U_{21}(\psi)$  и разности фаз  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$  для рассматриваемой модели ПП оказываются симметричными относительно частоты  $\psi = 2\pi$ , а их поведение – подобно тем закономерностям, которые были рассмотрены в работах [10], [11] для двухсекционных стержневых гидроакустических преобразователей. Результаты расчетов также показывают, что для заданного построения ПП и выбранного уровня излучения  $F_{VN}(\psi) = \text{const}$ , разные варианты линейной зависимости ФЧХ излучения:  $\varphi_V(\psi) = 0; \pm 0.5\psi; \pm\psi; \pi \pm \psi$  и т. д., в целом, не приводят к существенному различию в поведении частотных зависимостей отношения амплитуд возбуждающих электрических напряжений  $U_{21}(\psi)$ . При этом последние осциллируют в области частот  $\psi \approx 0.7\pi \dots 3.3\pi$  (более двух октав) вблизи некоторого среднего значения, зависящего от выбора уровня излучения  $F_{VN}(\psi) = \text{const}$ . На краях этой области частот значения  $U_{21}(\psi)$  устремляются к величинам, на несколько порядков превышающим уровень их осцилляций. Это обстоятельство указывает на то, что в определенных областях частот для рассматриваемой модели ПП не формируются моды колебаний, поддерживающие его

работу [11]. Указанная область частот осцилляций  $U_{21}(\psi)$  (соответствующая приемлемым с практической точки зрения соотношениям амплитуд  $U_{1m}$  и  $U_{2m}$ , например  $U_{21}(\psi) \leq 3 \dots 5$ ) и определяет возможную полосу пропускания рассматриваемой модели ПП при условии реализации каким-либо образом рассчитанных по формуле (2) частотных зависимостей  $U_{21}(\psi)$  и  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$ . С увеличением параметра  $\beta$  возрастает влияние прямого пьезоэффекта, которое проявляется в нарушении симметрии области осцилляций  $U_{21}(\psi)$  и смещении ее низкочастотной границы в сторону более низких частот, что приводит к некоторому увеличению полосы пропускания ПП. При этом по сравнению со случаем  $\beta = 0$  амплитуда низкочастотных осцилляций  $U_{21}(\psi)$  несколько уменьшается, а высокочастотных – увеличивается.

Что касается разности фаз  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$ , то ее частотные зависимости в большей мере определяются выбором ФЧХ излучения, причем в поведении частотных зависимостей  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$  можно выявить общую тенденцию: возможность аппроксимации их практически во всей области частот, соответствующей осцилляциям  $U_{21}(\psi)$ , линейно изменяющимся законом, допускающим в ряде случаев сравнительно простую реализацию с помощью линий задержки.

Увеличение задаваемого уровня излучения  $F_{VN}(\psi)$  приводит к сужению области частот (но не менее чем до  $\psi \approx \pi \dots 3\pi$ ), в которой наблюдаются осцилляции значений  $U_{21}(\psi)$  (рис. 3, а), а также к росту амплитуд этих осцилляций. Номера кривых здесь соответствуют: 1 –  $F_{VN}(\psi) = 0.1$ ; 2 –  $F_{VN}(\psi) = 0.2$ ; 3 –  $F_{VN}(\psi) = 0.4$ . ФЧХ излуче-

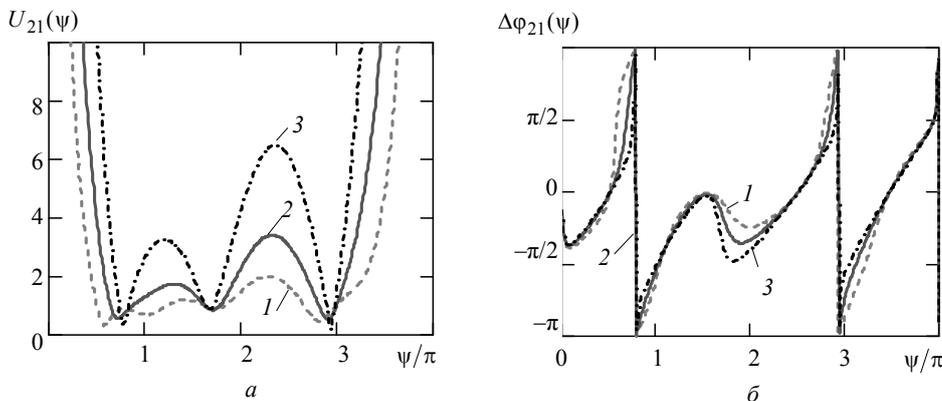


Рис. 3

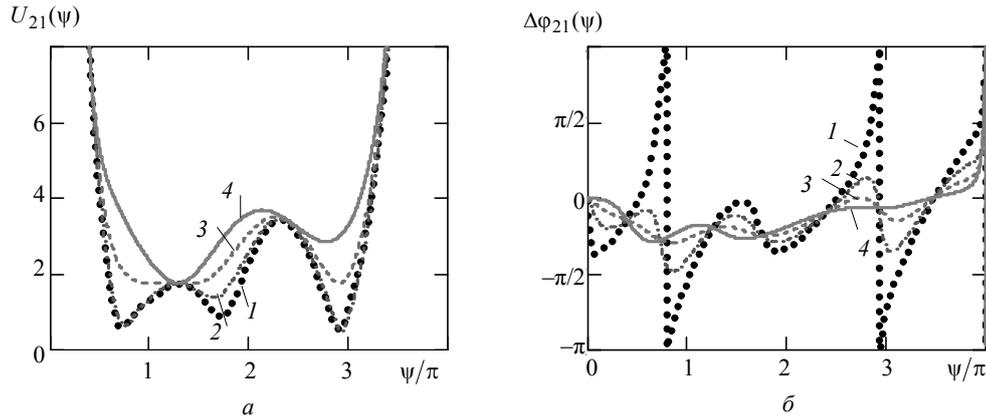


Рис. 4

ния в данном случае задана в виде  $\varphi_V(\psi) = \psi$ ;  $\beta = 0.4$ , остальные параметры ПП соответствуют рис. 2. Частотные зависимости разности фаз  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$  (рис. 3, б) возбуждающих электрических напряжений в этом случае, также несколько увеличивая осцилляционный характер своей зависимости, в целом сохраняют общую тенденцию своего поведения для выбранного закона изменения ФЧХ излучения  $\varphi_V(\psi)$ .

Использование промежуточного слоя между излучающей поверхностью ПП и водной средой, который можно рассматривать как защитный, сравнительно слабо влияет на рассматриваемые частотные зависимости  $U_{21}(\psi)$  и  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$ , но в некоторых случаях оказывает благоприятное действие. Так, использование волновой толщины слоя  $a_{1v}$ , кратной  $1/4$  длины звуковой волны в нем на выбранной частоте, несмотря на ограниченность своего действия по частоте способствует, как правило, небольшому увеличению диапазона частот осцилляций  $U_{21}(\psi)$  и уменьшению общего размаха их амплитуд. Изменение удельного импеданса слоя в пределах  $z_{1v} \approx (3...8) \cdot 10^6$  Па · с/м практически не сказывается на виде частотных зависимостей  $U_{21}(\psi)$  и  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$ .

При отсутствии промежуточного слоя на рис. 4 показано влияние на частотные зависимости  $U_{21}(\psi)$  (рис. 4, а) и  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$  (рис. 4, б) удельного импеданса среды  $z_v$ , в которую происходит излучение. Здесь были приняты следующие значения параметров ПП и условий излучения:  $p_1 = p_2 = p = 0.5$ ;  $a_{qv} = a_{qw} = 0$ ;  $z_w = 0$ ;  $\beta = 0.4$ ;  $F_{VN}(\psi) = 0.2$ ;  $\varphi_V(\psi) = \psi$ . Номера кривых соответствуют: 1 –  $z_v = 1.5 \cdot 10^6$  Па · с/м; 2 –  $z_v = 10 \cdot 10^6$  Па · с/м;

3 –  $z_v = 20 \cdot 10^6$  Па · с/м; 4 –  $z_v = 30 \cdot 10^6$  Па · с/м. Как видно, увеличение удельного импеданса среды  $z_v$  (чисто активной акустической нагрузки ПП во фронтальном направлении) не приводит к увеличению диапазона частот, в котором происходит осцилляционное изменение отношения амплитуд  $U_{21}(\psi)$ , а соответственно, и полосы пропускания ПП. При этом рост удельного импеданса  $z_v$  способствует уменьшению размаха амплитуды осцилляций  $U_{21}(\psi)$ , а также более пологому ходу частотной зависимости разности фаз  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$ , значения которой для кривой 4 для выбранной ФЧХ излучения находятся в пределах  $\Delta\varphi_{21}(\psi) \approx -\pi/4...0$ .

На рис. 5 показано влияние на частотные зависимости  $U_{21}(\psi)$  и  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$  тыльной нагрузки ПП, в частности среды с удельным импедансом  $z_w$ , в качестве которой может служить демпфер ( $z_w = z_d$ ). Параметры ПП и условия возбуждения приняты теми же, что и для рис. 4; излучение происходит в воду:  $z_v = 1.5 \cdot 10^6$  Па · с/м; номера кривых соответствуют: 1 –  $z_w = 0$ ; 2 –  $z_w = 10 \cdot 10^6$  Па · с/м; 3 –  $z_w = 20 \cdot 10^6$  Па · с/м; 4 –  $z_w = 30 \cdot 10^6$  Па · с/м. При увеличении степени демпфирования ПП его полоса пропускания, определяемая областью осцилляций  $U_{21}(\psi)$ , немного увеличивается лишь при  $z_d = z_w \geq 15 \cdot 10^6$  Па · с/м. При этом размах амплитуд осцилляций  $U_{21}(\psi)$  последовательно уменьшается с ростом  $z_w$ , а ход частотных зависимостей  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$  становится более пологим, приближаясь в данном случае к частотной зависимости  $\Delta\varphi_{21}(\psi) \approx -\pi/2(1 - \psi/2)$ .

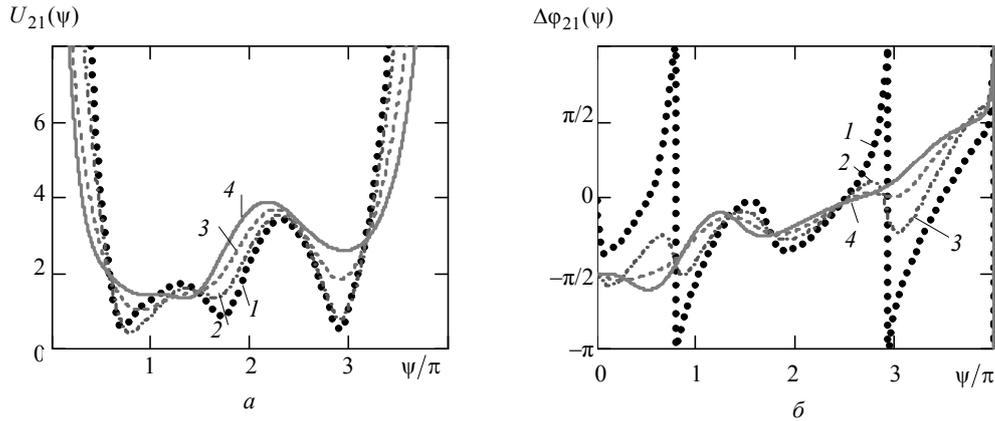


Рис. 5

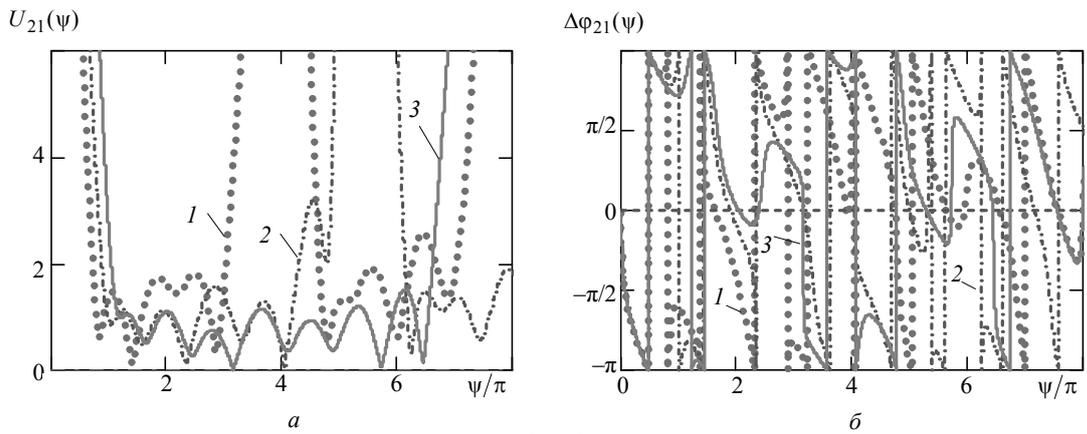


Рис. 6

Определенный интерес представляет влияние промежуточного пассивного слоя  $\Delta p = p_2 - p_1$ . Очень тонкие толщины слоя, когда  $\Delta p \leq 0.02$ , для разных значений его удельного импеданса  $z_c$  практически не сказываются на частотных зависимостях  $U_{21}(\psi)$  и  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$ . Для сравнительно тонких, но уже более реальных толщин слоя, когда  $\Delta p \approx 0.1$ , увеличение удельного импеданса слоя ( $z_c \geq 5 \cdot 10^6$  Па · с/м) способствует смещению правой границы диапазона осцилляций  $U_{21}(\psi)$  в сторону высоких частот, тем самым несколько увеличивая его. Наилучшие результаты в этом плане получаются, когда значение удельного импеданса промежуточного слоя сопоставимо с импедансом пьезопластин, например  $z_c \approx (20 \dots 40) 10^6$  Па · с/м. В этом случае на дальнейшее увеличение диапазона осцилляций  $U_{21}(\psi)$  за счет смещения его правой границы в область высоких частот преимущественно влияет толщина промежуточного слоя  $\Delta p$ . В качестве примера на рис. 6 показано влияние толщины слоя  $\Delta p$  на частотные зависимости  $U_{21}(\psi)$  (рис. 6, а) и  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$  (рис. 6, б). Параметры ПП, условия его

нагруженности и возбуждения здесь приняты следующими:  $a_{1v} = 0.125$ ;  $z_{1v} = 3 \cdot 10^6$  Па · с/м;  $a_{qv} = 0$ ;  $z_v = 1.5 \cdot 10^6$  Па · с/м;  $z_w = 0$ ;  $z_c = z = 30 \cdot 10^6$  Па · с/м;  $\beta = 0.4$ ;  $F_{VN}(\psi) = 0.2$ ;  $\varphi_V(\psi) = -\psi$ . Номера кривых соответствуют: 1 –  $\Delta p = 0$ ; 2 –  $\Delta p = 0.25$ ; 3 –  $\Delta p = 0.5$ . Фронтальный слой с параметрами  $a_{1v}$  и  $z_{1v}$  может выполнять роль защитного покрытия, а также позволяет уменьшить амплитуду осцилляций в области частот  $\psi \geq 3\pi$ .

Приведенные результаты расчетов показывают, что конструктивные особенности и характер возбуждения рассматриваемой модели ПП обеспечивают их работу в достаточно широком диапазоне частот (2...4 октавы), ограниченном резким возрастанием значений отношения амплитуд  $U_{21}(\psi)$ . В связи с этим для практической реализации АЧХ излучения и частотных зависимостей  $U_{21}(\psi)$  и  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$ , целесообразно ограничить область частот их определения областью осцилляций  $U_{21}(\psi)$ , в которой задается уровень излучения  $F_{VN}(\psi) = \text{const}$ , подобно тому, как это показано на рис. 7, а (кривая 1). Параметры ПП, условия его нагружен-

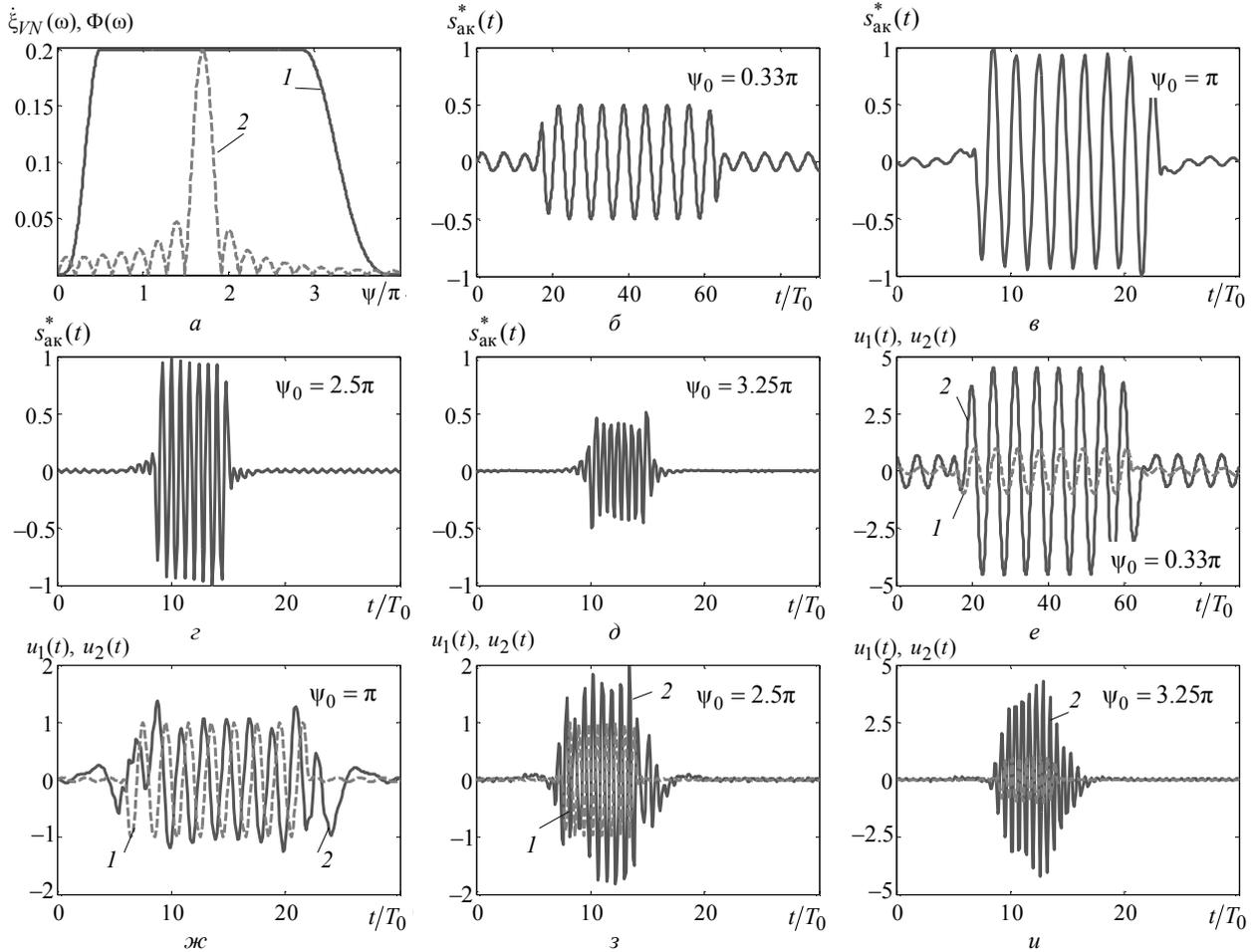


Рис. 7

ности и возбуждения здесь приняты следующими:  $a_{1v} = 0.3$ ;  $z_{1v} = 5 \cdot 10^6$  Па · с/м;  $a_{qw} = 0$ ;  $z_v = 1.5 \cdot 10^6$  Па · с/м;  $z_w = 0$ ;  $z = 30 \cdot 10^6$  Па · с/м;  $p_1 = p_2 = p = 0.5$ ;  $\beta = 0.4$ ;  $F_{VN}(\psi) = 0.2$ ;  $\varphi_V(\psi) = \psi$ . Приведенная АЧХ излучения может быть определена экспериментально (см., напр., [13]) формированием сигналов возбуждения  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ , подаваемых на первую и вторую пьезопластины ПП. АЧХ излучения в этом случае определяется в квазигармоническом режиме с использованием радиоимпульсов. Сигналы  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  определяются по формулам [13]:

$$u_1(t) = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) U_1(\omega) e^{j\omega t} d\omega;$$

$$u_2(t) = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) U_2(\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

где  $\Phi(\omega)$  – спектральная функция сигнала, который требуется излучить;  $\omega_B$  – верхний предел интегрирования, определяющий полноту спек-

тральных составляющих в  $\Phi(\omega)$ , например по уровню  $\Phi_{\min}(\omega_B)/\Phi_{\max}(\omega) \leq 0.1$ . С учетом того, что электрическое напряжение  $U_1$  может быть задано в виде  $U_1 = \operatorname{const} = A_0$ , выражения для сигналов возбуждения примут вид

$$u_1(t) = 2A_0 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) e^{j\omega t} d\omega;$$

$$u_2(t) = 2A_0 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) U_{21}(\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

При этом сигнал возбуждения  $u_1(t)$  будет соответствовать сигналу, который требуется излучить. Акустический сигнал, излученный ПП, можно определить как

$$s_{\text{ак}}(t) = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) \xi_{VN}(\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

В качестве примера на рис. 7, а приведен также вид спектральной функции  $\Phi(\omega)$  (кривая 2) сигнала возбуждения  $u_1(t)$  в виде радиоимпульса, содержащего 8 периодов на частоте

его формирования  $\psi_0 = 1.7\pi$ . На рис. 7, б–д показаны нормированные к своему максимальному значению акустические сигналы  $s_{ак}^*(t)$ , получающиеся на частотах своего формирования  $\psi_0 = 0.33\pi$  и  $\psi_0 = 3.25\pi$ , для которых АЧХ излучения  $\xi_{FN}(\omega)$  соответствует значениям на ее склонах. Акустические сигналы для частот  $\psi_0 = \pi$  и  $\psi_0 = 2.5\pi$  соответствуют значению АЧХ излучения на ее равномерном участке. На рис. 7, е–и для указанных значений частот показаны сигналы возбуждения  $u_1(t)$  (кривые 1) и  $u_2(t)$  (кривые 2), которые необходимо подать на 1-ю и 2-ю пьезопластины для формирования приведенных акустических сигналов и получающейся при этом АЧХ излучения. Здесь для удобства сопоставления нормирование выполнено к уровню амплитуды сигнала возбуждения  $u_1(t)$ , которая должна поддерживаться постоянной при измерении АЧХ излучения;  $T_0 = 1/f_0$  – период. Если в результате возбуждения пьезопластин ПП в соответствии с решением задачи синтеза данные расчета (или измерения) амплитуды акустических радиоимпульсов будут соответствовать приведенной на рис. 7, а АЧХ излучения, то можно утверждать, что при этом будет формироваться и близкая к линейной ФЧХ излучения. В частности, для

стержневых преобразователей с фазированным возбуждением двух секций в соответствии с задачей синтеза в [13] экспериментально показана возможность получения близкой к равномерной АЧХ излучения, а также – перестройки по частоте акустических коротких импульсов.

Таким образом, в результате решения в одномерном приближении задачи синтеза показана возможность построения ультразвуковых широкополосных ПП с помощью возбуждения двух образующих его пьезопластин различными по амплитуде и фазе электрическими напряжениями. Расширение полосы пропускания таких ПП преимущественным образом происходит в сторону высоких частот относительно резонансной частоты ПП при его синфазном возбуждении. Это обстоятельство может упростить изготовление высокочастотных ПП, например для целей дефектоскопии. Реализация соотношений между возбуждающими электрическими напряжениями, определенными из условия (2), позволяет обеспечить равномерную АЧХ и линейную ФЧХ излучения ПП в полосе частот 2...4 октавы при различной нагруженности внешних поверхностей его пьезопластин. Это может служить основой для формирования перестраиваемых по частоте ультракоротких (1–2 периода) акустических импульсов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кескюла А. Ю. Способы увеличения широкополосности акустического тракта дефектоскопических устройств // Дефектоскопия. 1975. № 3. С. 50–61.
2. Королев М. В., Карпельсон А. Е. Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М.: Машиностроение, 1982. 160 с.
3. Кажис Р.-Й. Ультразвуковые информационно-измерительные системы. Вильнюс: Моклас, 1986. 216 с.
4. Пьезокерамические преобразователи: справ. / под ред. С. И. Пугачева. Гл. 5–7. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.
5. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
6. Пьезоэлектрические преобразователи для акустических приборов / Т. К. Исмаилов, А. М. Измайлов, Ф. М. Аллахвердов, З. Ш. Аллахвердова // Измерения, контроль, автоматизация. 1991. № 1. С. 43–53.
7. Гиттис М. Б. Преобразователи для импульсной ультразвуковой дефектоскопии. Основные теоретические положения // Дефектоскопия. 1981. № 2. С. 65–81.
8. Задириенко И. М., Кузьменко А. Г. Излучение коротких акустических импульсов стержневыми пьезокерамическими преобразователями при возбуждении электрическими сигналами сложной формы // Акуст. журн. 1984. Т. 30, № 3. С. 328–330.
9. Дианов Д. Б., Степанов Б. Г. О создании мощных акустических импульсов в водной среде // Изв. ГЭТУ. 1995. Вып. 485. С. 10–16.
10. Степанов Б. Г. Анализ и синтез частотных характеристик двухсекционных стержневых преобразователей с фазированным возбуждением // Тр. VIII междунар. конф. ГА–2006 «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 2006. С. 195–199.
11. Степанов Б. Г. О возможности построения широкополосных стержневых пьезопреобразователей с фазированным возбуждением секций // Акуст. журн. 2009. Т. 55, № 3. С. 407–414.
12. Дианов Д. Б., Кузнецов В. М. Влияние переходных слоев на частотные характеристики стержневых пьезопреобразователей // Изв. ЛЭТИ. 1968. Вып. 63. С. 60–78.
13. Степанов Б. Г. Об экспериментальных исследованиях широкополосных стержневых преобразователей с фазированным возбуждением двух секций // Тр. XII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 27–29 мая 2014. С. 444–448.

B. G. Stepanov

*Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»*

## SYNTHESIS OF FREQUENCY CHARACTERISTICS WIDEBAND PLATE-LIKE PIEZO-TRANSDUCERS BY THEIR PHASING THICKNESS OSCILLATIONS

*We consider the results of calculations of the frequency characteristics obtained in the solution of synthesis problems for ultrasonic transducers, containing two piezo plates divided among themselves by a passive layer and generated by electric voltages different in both amplitudes and phases. By a choice of the last possibility of expansion of a pass-band to 2...4 octaves under condition of maintenance uniform amplitude-frequency and linear phase-frequency radiation characteristics is shown. Influence on these characteristics of construction parameters of transducers is analyzed.*

**Ultrasonic transducer, wideband, synthesis frequency characteristics, phased excitation**

---