

УДК 681.883; 534.232

Н. А. Быстрова, Б. Г. Степанов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Импульсный режим работы пластинчатого преобразователя с амплитудно-фазовым возбуждением образующих его пьезопластин

*Рассматриваются результаты расчетов в импульсном режиме работы широкополосного пластинчатого преобразователя, содержащего две пьезопластины, разделенные пассивным слоем и возбуждаемые разными по амплитуде и фазе электрическими напряжениями. Характер возбуждения и формирования необходимых электрических сигналов базируется на решении задачи синтеза, когда по заданным равномерной амплитудно-частотной и линейной фазочастотной характеристикам излучения определяются необходимые для их реализации соотношения между электрическими напряжениями. Результатом решения задачи синтеза является возможность излучения перестраиваемых в широкой полосе частот коротких (1...1.5 периода колебаний) акустических импульсов. Оценивается влияние ограниченности амплитудно-частотной характеристики излучения на частоты формирования коротких акустических импульсов и соответствие этих частот заданным. Анализируется влияние параметров конструкции и характера нагруженности пластинчатого преобразователя на вид импульсов возбуждения, подаваемых на пьезопластины.*

### Ультразвуковой преобразователь, амплитудно-фазовое возбуждение, короткий акустический импульс, задача синтеза

Использование традиционных путей расширения полосы пропускания ультразвуковых преобразователей (согласующих слоев, электрических корректирующих цепей, демпфирования и т. п.), позволяя получить сравнительно широкополосную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) излучения, как правило, не обеспечивает линейность фазочастотной характеристики (ФЧХ) излучения [1]. При этом стремление получить широкополосную АЧХ обычно увязывается с задачей формирования коротких акустических сигналов [2]. Известные методы, базирующиеся на возбуждении преобразователей определенной последовательностью электрических импульсов, обеспечивающих компенсацию свободных колебаний преобразователей [3], [4], позволяют формировать короткие акустические импульсы лишь на одной частоте, связанной с полуволновым размером пьезоэлемента, при этом их амплитуда определяется начальным участком нарастания установившихся колебаний. Интересен по своей ре-

ализации метод формирования коротких акустических импульсов с помощью решения обратной задачи: определения импульса возбуждения по заданному акустическому импульсу с использованием методов решения операторных уравнений, определения функционала невязки и интегральных преобразований Фурье [5]. В какой-то мере это решение относится к задачам синтеза [6], однако представленный в них подход не предусматривает возможности перестройки формируемых импульсов.

**Постановка задачи и основные положения.** Для практики представляет интерес не только получение коротких (1...1.5 периода колебаний) акустических импульсов, но и возможность их перестройки по частоте в широкой полосе частот с помощью одного преобразователя. На рис. 1 показана расчетная модель пластинчатого преобразователя (ПП), содержащего пьезопластины 1 и 2, разделенные пассивным слоем 3. Каждая пьезопластина возбуждается электрическими напряже-

ниями  $U_i = U_{im}(\omega)e^{j\varphi_i(\omega)}$ , в общем случае зависящими от частоты, где  $U_{im}(\omega)$  и  $\varphi_i(\omega)$  – амплитуда и фаза,  $i = 1, 2$ . Внешние торцы пьезопластин нагружены на входные импедансы  $Z_v$  и  $Z_w$  плоскопараллельных пассивных слоев [7], которые, в свою очередь, контактируют с полубезграничными средами с удельными импедансами  $z_v$  и  $z_w$ .

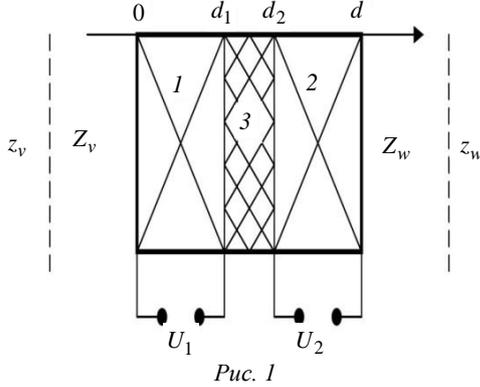


Рис. 1

Для определенности рассмотрим излучение левым внешним торцом такого ПП, колебательную скорость которого можно записать в следующем виде:  $\dot{\xi}_v(\psi) = K_v \dot{\xi}_1(0) = NF_v^*(\psi)$ , где  $K_v$  – коэффициент передачи по колебательной скорости через плоскопараллельные слои с входным импедансом  $Z_v$ ;  $\dot{\xi}_1(0)$  – колебательная скорость первой пьезопластины при  $z = 0$  (рис. 1);  $N = e_{33}/(z_k d)$  – масштабный множитель,  $e_{33}$  – пьезопостоянная,  $z_k$  – удельный импеданс пьезопластин;  $F_v^*(\psi) = F_v(\psi)e^{j\varphi_v(\psi)}$  – задаваемая комплексная функция, модуль  $F_v(\psi)$  и аргумент  $\varphi_v(\psi)$  которой определяют вид АЧХ и ФЧХ излучения рассматриваемого ПП;  $\psi = kd$ ,  $k = \omega/c_k$ ,  $\omega$  – круговая частота,  $c_k$  – скорость звука в пьезопластине. Базируясь на решении граничной задачи [8] с учетом уравнений пьезоэффекта, из выражения для  $\dot{\xi}_v(\psi)$  можно получить соотношение между подаваемыми на пьезопластины электрическими напряжениями  $U_1$  и  $U_2$ , необходимыми для реализации заданных АЧХ и ФЧХ излучения ПП, что и определяет решение задачи синтеза:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\Delta(\psi)F_v^*(\psi) + jN_1(\psi)K_v/p_1}{jN_2(\psi)K_v/(1-p_2)} = U_{21}(\psi) \exp[j\Delta\varphi_{21}(\psi)],$$

где  $U_{21}(\psi) = U_{2m}(\psi)/U_{1m}(\psi)$  и  $\Delta\varphi_{21}(\psi) = \varphi_2(\psi) - \varphi_1(\psi)$  – отношение амплитуд и разность фаз возбуждающих напряжений;  $\Delta(\psi)$ ,  $N_1(\psi)$  и  $N_2(\psi)$  – функции, определяемые при решении граничной задачи [8];  $p_1 = d_1/d$ ;  $p_2 = d_2/d$ .

С позиции рассмотрения ПП как устройства, не искажающего передачу импульсного сигнала, следует выбирать равномерную АЧХ и линейную ФЧХ излучения ПП. Согласно расчетам [8], [9], в области частот порядка 2–3 окт отношение амплитуд  $U_{21}(\psi)$  осциллирует относительно некоторой средней величины, которая определяется заданным уровнем АЧХ излучения  $F_v(\psi) = \text{const}$ . Эта область частот ограничивается справа и слева достаточно резким (более чем на порядок) ростом значений  $U_{21}(\psi)$  на сравнительно узких участках частот, положение которых зависит от выбора задаваемых параметров  $p_1$  и  $p_2$ . Указанная область частот фактически и определяет полосу пропускания рассматриваемой модели ПП.

Частотные зависимости  $U_{21}(\psi)$  и  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$ , а также варианты представления их составляющих достаточно сложны для практической реализации. Однако ситуация упрощается, если представить нужные сигналы во временной области. При этом для принятого соотношения электрических напряжений  $U_{21}(\psi)$  целесообразно выбрать  $U_1(\psi) = \text{const}$ , тогда  $U_2(\psi)$  будет пропорционально  $U_{21}(\psi)$ . В этом случае вид нужного акустического импульса со спектральной плотностью  $\Phi(\omega)$ , который следует излучить, будет совпадать с видом электрического (базового) импульса, подаваемого на пьезопластину 1, а электрический импульс, подаваемый на пьезопластину 2, будет корректирующим. Акустический импульс  $s_{\text{ак}}(t)$  и электрические сигналы  $u_i(t)$ , подаваемые на пьезопластины 1 и 2, с точностью до постоянного множителя могут быть определены как

$$s_{\text{ак}}(t) = 2 \text{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) \dot{\xi}_v(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad \text{и} \quad u_i(t) = 2 \text{Re} \int_0^{\omega_B} \Phi(\omega) U_i(\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

где  $\omega_B$  – верхний предел интегрирования, определяющий полноту спектральных составляющих в  $\Phi(\omega)$ , например по уровню  $\Phi_{\text{min}}(\omega)/\Phi_{\text{max}}(\omega) \leq 0.1$ .

Параметры плоскопараллельных слоев с входным импедансом  $Z_v$  характеризуются их удельными импедансами  $z_{qv}$  и волновыми размерами  $\psi_{qv} = a_{qv}\psi$ , где  $a_{qv} = cd_q/(c_qd)$  – коэффициент пропорциональности,  $d_q$  и  $c_q$  – толщина и скорость звука  $q$ -го слоя,  $q = 1, 2, \dots$ . Отсчет ведется от внешней среды с удельным импедансом  $z_v$ . Для возможности последующей оценки отметим, что в случае использования четвертьволновых (например, согласующих) слоев для ПП, работающих на толщинной моде колебаний, в зависимости от значения коэффициента электромеханической связи материала пьезопластин  $k_{33} \approx 0.1 \dots 0.7$  значение коэффициента пропорциональности находится в пределах  $a_{qv} \approx 0.5 \dots 0.65$ .

**Результаты расчетов и их анализ.** Рассмотрим возможность излучения однопериодного акустического импульса на разных частотах с помощью предложенной модели ПП. Для модели односторонне нагруженного на воду ( $z_v = 1.5 \cdot 10^6$  Па · с/м;  $z_w = 0$ ) ПП в виде двух пьезопластин равной толщины ( $p_1 = p_2 = 0.5$ ) без пассивного слоя 3 и с одним внешним пассивным (защитным) слоем ( $a_{1v} = 0.2$  и  $z_{1v} = 2.7 \cdot 10^6$  Па · с/м) на рис. 2 показаны задаваемая ограниченная АЧХ излучения  $|\dot{\xi}_{vN}(\psi)|$  и частотные зависимости отношения амплитуд  $U_{21}(\psi)$  и разности фаз  $\Delta\phi_{21}(\psi)$  электрических напряжений (сплошные линии для ограниченной нормированной АЧХ излучения  $\dot{\xi}_{vN}(\psi)$  [9], а штриховые – для случая  $\dot{\xi}_{vN}(\psi) = \text{const}$  во всем диапазоне частот ПП). Импеданс и коэффициент электромеханической связи пьезопластин:  $z_k = 30 \cdot 10^6$  Па · с/м и

$k_{33} = 0.65$ . Уровень равномерной части АЧХ излучения  $\dot{\xi}_{vN}(\psi)$  в диапазоне частот  $\psi \in [0.6\pi, 2.9\pi]$  задавался равным  $F_{vN} = 0.2$ , что соответствует уровню излучения такого ПП при его синфазном возбуждении ( $U_{21}(\psi) = 1$  и  $\Delta\phi_{21}(\psi) = 0$ ), но при наличии демпфера с удельным импедансом  $z_d = z_w = 6 \cdot 10^6$  Па · с/м, обеспечивающего полосу пропускания 25%. Здесь  $F_{vN}$ , как и  $\dot{\xi}_{vN}(\psi)$ , – величины, нормированные к максимальному значению колебательной скорости при синфазном возбуждении односторонне нагруженного на воду ПП без пассивных элементов [8]. Убывание АЧХ по краям в областях  $\psi \in [0, 0.6\pi]$  и  $\psi \in [2.9\pi, 4\pi]$  задавалось функциями  $F_{vN} \sin^2(\psi)$  и  $F_{vN} \sin^4(2.27\pi + 0.43\psi)$ . ФЧХ излучения принималась в виде  $\phi_v(\psi) = \psi$ . В итоге полоса пропускания для рассматриваемой модели ПП составила почти 3 окт. Базовым импульсом возбуждения  $u_1(t)$  в данном случае служит однопериодный импульс со спектральной плотностью  $\Phi(\omega) = \frac{j2A_{\text{им}} \sin(\pi\omega/\omega_{\text{им}})}{\omega_{\text{им}} 1 - (\omega/\omega_{\text{им}})^2} e^{-j\pi\omega/\omega_{\text{им}}}$ , где  $A_{\text{им}}$  и  $\omega_{\text{им}}$  – амплитуда и частота формирования импульса. На рис. 2, а приведены также нормированные до уровня  $F_{vN}$  (для удобства сопоставления) спектральные плотности  $\Phi(\omega)$  для трех значений частот формирования однопериодного импульса  $\omega_{\text{им}} = \omega_0$ ,  $\omega_{\text{им}} = 2\omega_0$  и  $\omega_{\text{им}} = 3\omega_0$ , которые соответствуют значениям волнового размера  $\psi = \psi_{\text{им}} = \pi$ ,  $\psi_{\text{им}} = 2\pi$  и  $\psi_{\text{им}} = 3\pi$ . Нумерация кривых на рис. 2, а соответствует: 1 – заданная ограниченная АЧХ излучения; 2 –  $\Phi(\omega_0)$ ; 3 –  $\Phi(2\omega_0)$ ; 4 –  $\Phi(3\omega_0)$ .

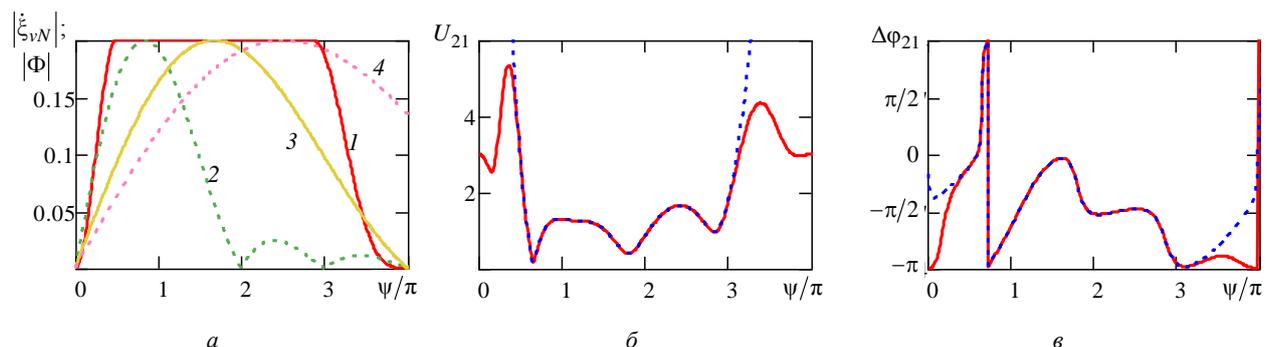


Рис. 2

На рис. 3 для указанной модели ПП приведены излучаемые им акустические импульсы  $s_{ак}(t)$ , которые получаются при возбуждении пьезопластин 1 и 2 электрическими импульсами  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  соответственно на трех частотах их формирования. Сигналы  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  нормированы к амплитуде базового однопериодного импульса  $u_1(t)$ . Временная шкала пронормирована к длительности одного полупериода на частоте  $\omega_0$ , т. е.  $T_0 = \pi/\omega_0$ . Изменение параметров защитного слоя (в данном случае  $a_{1v}$  и  $z_{1v}$ ) в достаточно широких пределах ( $a_{1v} \approx 0.1 \dots 0.6$  и  $z_{1v} \approx (2 \dots 25) \cdot 10^6$  Па·с/м) отражается на виде частотных зависимостей отношения амплитуд  $U_{21}(\psi)$  и разности фаз  $\Delta\phi_{21}(\psi)$  электрических напряжений, а также на форме корректирующего импульса  $u_2(t)$ , причем изменение последнего не принципиально. Основное влияние на  $u_2(t)$  оказывает не удельный импеданс  $z_{1v}$  защитного слоя, а его толщина, увеличение которой приводит к росту числа колебаний в структуре корректирующего импульса, а также к небольшому уменьшению его амплитуды в области частот  $\omega_{им} \approx 3\omega_0$ , когда различие в максимальных амплитудах импульсов  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  составляет 1.5...1.8 раза.

Следует отметить, что при формировании коротких акустических импульсов с помощью ПП, возбуждаемых согласно решению задачи синтеза,

амплитуда этих сигналов определяется заданным уровнем равномерного участка АЧХ излучения (в данном случае  $F_{vN}$ ), при этом сигнал  $s_{ак}(t)$  как бы «вырезается» из монохромата, т. е. соответствует заданному уровню АЧХ излучения. При использовании методов компенсации свободных колебаний [3], [4] обычно остаются первые два-три полупериода начального переходного процесса, определяемого сравнительно небольшой полосой пропускания синфазно возбуждаемого ПП. В этом случае амплитуда получающихся акустических импульсов оказывается в несколько раз меньшей, чем для рассматриваемого метода возбуждения. Указанное обстоятельство находит свое экспериментальное подтверждение применительно к стержневым преобразователям [10].

Ограниченность области осцилляций отношения амплитуд  $U_{21}(\psi)$ , а соответственно, и задаваемой АЧХ излучения, приводит к тому, что по мере увеличения частоты формирования короткого акустического импульса  $s_{ак}(t)$  основная область его спектральной плотности со своим максимумом смещается в область высоких частот и при этом может выйти за пределы АЧХ излучения ПП (см. рис. 2, а). Это приводит к обеднению спектральных составляющих, участвующих в формировании импульса, появлению дополнительных колебаний в его структуре (рис. 3), а также к изменению его частоты формирования  $\psi_{ф}$  относительно заданной  $\psi_{им}$ . Оценку данного изменения можно провести по разнице длитель-

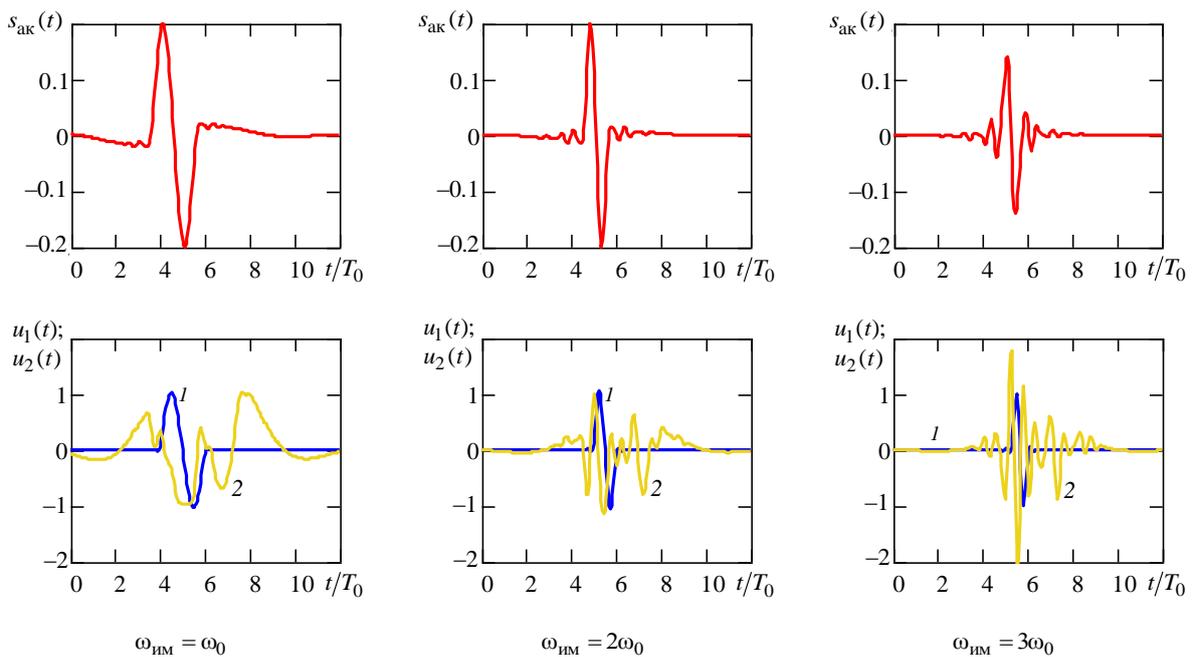


Рис. 3

Параметр	Значение					
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Заданная частота формирования импульса $\psi_{им}/\pi$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Фактическая частота формирования акустического импульса $\psi_{ф}/\pi$	0.579	1.007	1.37	1.754	1.99	2.1
Относительная погрешность, %	15.8	0.7	8.6	12.3	20.5	29.8

ности периодов заданного и сформированного акустических импульсов с последующим пересчетом в частотную область. Для рассмотренного варианта построения ПП и его АЧХ (рис. 2, а) в таблице представлены результаты сравнительной оценки частоты формирования однопериодного импульса. Относительная погрешность (в процентах) определялась по формуле  $\Delta = \left| \psi_{им} - \psi_{ф} \right| / \psi_{им} \cdot 100$ . В данном случае при  $\psi_{им}/\pi < 1$ , когда основная область спектральной плотности выходит за низкочастотную границу АЧХ излучения, фактическая частота акустического импульса  $\psi_{ф}$  увеличивается, а при  $\psi_{им}/\pi > 1$  уменьшается, причем с приближением  $\psi_{им}$  к высокочастотной границе АЧХ излучения разность  $(\psi_{им} - \psi_{ф})$  становится все более существенной. Очевидно, что с увеличением числа периодов в импульсе его спектральная плотность локализуется в меньшей области частот (см., например, [8, рис. 7] и погрешность  $\Delta$  как в собственной полосе АЧХ, так и с приближением к ее границам уменьшается.

Если не ограничивать АЧХ излучения, задавая  $F_{vN} = \text{const}$  во всем диапазоне частот, то, с одной стороны, это приведет к устранению искажений в структуре акустического импульса, с другой же – к существенному (зависит от параметров ПП и характера его нагруженности) увеличению амплитуды колебаний в структуре корректирующего импульса, а также к увеличению его длительности.

При возбуждении ПП согласно решению задачи синтеза, когда АЧХ и ФЧХ излучения задаются, значения параметров импедансов  $Z_v$  и  $Z_w$  не влияют на эти характеристики, а также на полученную (заданную) форму акустического импульса  $s_{ак}(t)$  на выбранной частоте. Однако значения данных параметров отражаются на виде частотных зависимостей  $U_{21}(\psi)$  и  $\Delta\varphi_{21}(\psi)$ , т. е. на форме корректирующего импульса  $u_2(t)$  и на соотношении амплитуд между ним и базовым импульсом  $u_1(t)$ . Кроме того, различие между амплитудами указанных импульсов увеличивается с ростом задаваемого уровня излучения  $F_{vN}$  и с увеличением толщины первой пьезопластины по

отношению ко второй [8], [9]. В последнем случае при малой толщине пассивного слоя 3, когда  $p_1 \approx p_2 \geq 0.75$ , область осцилляций  $U_{21}(\psi)$  смещается в сторону высоких частот и составляет  $\psi \approx \pi \dots 7\pi$ .

Определенный интерес представляет работа рассматриваемой модели ПП на твердые среды, которые имеют почти на порядок большее значение удельного импеданса  $z_v$  по сравнению с водой. При этом большое влияние на работу ПП могут оказывать низкоимпедансные контактный и клеевой слои, расположенные между контролируемой твердой средой и защитным слоем и между ним и пьезопластиной соответственно. На практике толщины контактного и клеевого слоев достаточно малы, но учет их важен и необходим. Как уже отмечалось, влияние такой трехслойной системы: контактного, защитного и клеевого слоев с параметрами  $a_{1v}$  и  $z_{1v}$ ,  $a_{2v}$  и  $z_{2v}$ ,  $a_{3v}$  и  $z_{3v}$  соответственно, при возбуждении ПП согласно решению задачи синтеза в основном будет отражаться на виде корректирующего импульса  $u_2(t)$ . Здесь можно выделить два основных момента, приводящих к росту амплитуд корректирующего импульса  $u_2(t)$ : увеличение удельного импеданса  $z_v$  контролируемой твердой среды, а также увеличение толщины контактного и клеевого слоев, значения удельных импедансов которых, как правило, находятся в пределах  $z_{1v} = (1.3 \dots 2.2) \cdot 10^6$  Па · с/м (в зависимости от вязкости) и  $z_{3v} = (2.4 \dots 3.2) \cdot 10^6$  Па · с/м. Так, при непосредственной работе ПП на твердую среду увеличение  $z_v$  до значения  $45 \cdot 10^6$  Па · с/м (сталь) приводит к росту максимальной амплитуды  $u_2(t)$  в 4 раза по сравнению с базовым однопериодным импульсом  $u_1(t)$ . Аналогичным образом ведет себя тыльная нагрузка ПП в виде демпфера ( $z_d = z_w$ ) при фронтальной нагрузке ПП на воду ( $z_v = 1.5 \cdot 10^6$  Па · с/м). При этом максимальное различие в амплитудах между  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  несколько меньше – до 3 раз. Однако здесь следует иметь в виду, что для рассматриваемой модели ПП и способа его возбуждения демпфер не нужен.

Наличие промежуточных слоев отражается на увеличении длительности колебаний в структуре корректирующего импульса и на росте их максимальных амплитуд. Здесь существенное влияние могут оказывать контактный и клеевой слой. Однако при значении их волновых параметров ( $a_{1v}, a_{3v}$ )  $\leq 0.01$  это влияние проявляется сравнительно слабо. При отработанной технологии сборки ПП обычно это условие выполняется, а толщины указанных слоев составляют  $\sim 10$  мкм. Для ( $a_{1v}, a_{3v}$ )  $> 0.02$  начинает увеличиваться амплитуда колебаний корректирующего импульса  $u_2(t)$ , которая может превосходить базовый импульс на порядок и более. Указанная оценка относится к случаю сравнительно больших удельных импедансов твердых сред  $z_v$  (например, стали). Для меньших их значений  $z_v \leq 15$  Па · с/м (композитные материалы, алюминиевые сплавы и др.) негативное влияние контактного и клеевого слоев снижается и уменьшается различие между максимальными амплитудами импульсов  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ .

В качестве примера на рис. 4 показаны импульсы возбуждения  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ , сформированные на частоте  $\omega_{им} = 2\omega_0$  ( $\psi_{им} = 2\pi$ ) для разных вариантов нагруженности первой пьезопластины ПП: непосредственно на твердую среду (рис. 4, а), через дополнительный защитный слой (рис. 4, б) и через трехслойную систему (рис. 4, в). Номера кривых на рисунке соответствуют: 1 –  $u_1(t)$ ; 2 –  $u_2(t)$ . Параметры ПП и его нагрузочные характеристики были следующими:  $p_1 = p_2 = 0.5$ ;  $z_v = 45 \cdot 10^6$  Па · с/м (сталь);  $z_w = 0$ ; контактный слой:  $a_{1v} = 0.01$  и  $z_{1v} = 1.5 \cdot 10^6$  Па · с/м; защитный слой:  $a_{2v} = 0.25$  и  $z_{2v} = 15 \cdot 10^6$  Па · с/м (материал с высокой степенью износостойкости, например ситалл, плав-

ленный кварц и т. п.); клеевой слой:  $a_{3v} = 0.01$  и  $z_{3v} = 2.7 \cdot 10^6$  Па · с/м (эпоксидные компаунды);  $z_k = 30 \cdot 10^6$  Па · с/м;  $k_{33} = 0.65$ . Вид АЧХ и ФЧХ излучения был выбран тем же, что для рис. 2 и 3. При этом акустический импульс  $s_{ак}(t)$  независимо от характера нагруженности ПП (импеданса  $Z_v$ ) имел вид, показанный на рис. 3 ( $\omega_{им} = 2\omega_0$ ). Уменьшение импеданса контролируемой среды до  $z_v = (15...25) \cdot 10^6$  Па · с/м приводит к уменьшению различия в максимальных амплитудах импульсов  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  соответственно до 2–3 раз. Следует также отметить не критичность выбора параметров защитного слоя. В частности, для рассмотренного примера построения ПП изменение параметров защитного слоя в пределах  $a_{2v} = 0.2...0.6$  и  $z_{2v} = (13...35) \cdot 10^6$  Па · с/м принципиально не отражается на структуре и соотношении амплитуд импульсов возбуждения.

Рассмотренная модель построения и возбуждения ПП позволяет формировать короткие одно-периодные акустические импульсы, перестраиваемые по частоте в достаточно большом диапазоне (1.5...1.8 окт). Этот диапазон перестройки уже полосы пропускания задаваемой АЧХ излучения ПП (порядка 2–3 окт), что обусловлено в основном отставанием частоты формирования акустического импульса  $\psi_\phi$  от заданного значения этой частоты  $\psi_{им}$  (длительность акустического импульса постепенно перестает меняться при приближении частоты его формирования к верхней границе АЧХ излучения). Указанное несоответствие связано с вынужденной ограниченностью АЧХ излучения, обусловленной выбором приемлемого с практической точки зрения соотношения между амплитудами электрических напряжений (импульсов), возбуждающих две пьезо-

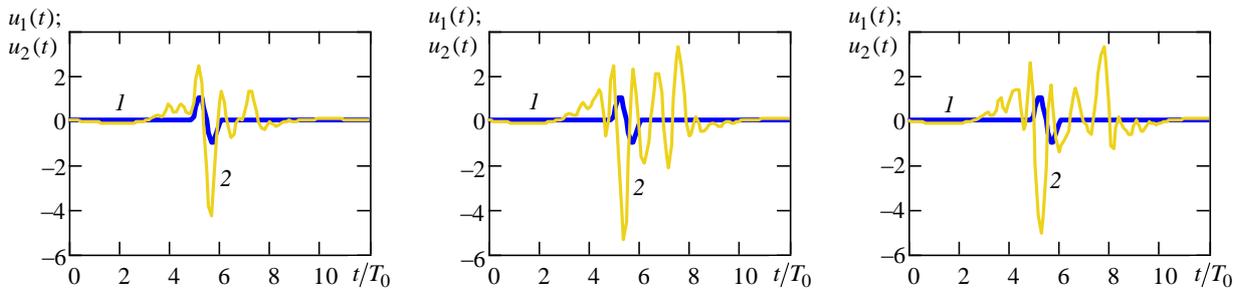


Рис. 4

зопластины ПП. При увеличении длительности формируемого акустического импульса уменьшается различие между диапазоном его перестройки и заданной полосой пропускания АЧХ излучения. В статье приводится оценка влияния ряда параметров конструкции ПП и характера его нагруженности на итоговые характеристики излучения и импульсы возбуждения. Полученные результа-

ты могут применяться при проектировании широкополосных ПП, используемых для различных целей дефектоскопии и подводной акустики. В частности, возможность формирования коротких акустических импульсов повышает разрешающую способность обнаружения дефектов (объектов) и позволяет получить дополнительную информацию о них.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиттис М. Б. Преобразователи для импульсной ультразвуковой дефектоскопии. Основные теоретические положения // Дефектоскопия. 1981. № 2. С. 65–81.
2. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014.
3. Найда С. А. Возбуждение коротких ультразвуковых импульсов недемпфированным пьезоэлектрическим преобразователем // Электроника и связь. Вып. «Акуст. приборы и сист.». 2012. № 2. С. 35–40.
4. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. О применимости метода Даламбера к анализу импульсного акустического сигнала на выходе пьезоизлучателя // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 4. С. 61–66.
5. Гончарский А. В., Романов С. Ю., Серёжников С. Ю. Обратные задачи формирования зондирующих импульсов в ультразвуковой томографии: модельные расчеты и эксперимент // Вычислительные методы и программирование. 2018. Т. 19, вып. 2. С. 150–157.
6. Касаткин Б. А. Постановка задачи синтеза в теории пьезопреобразователей // Дефектоскопия. 1980. № 1. С. 5–11.
7. Дианов Д. Б., Кузнецов В. М. Влияние переходных слоев на частотные характеристики стержневых пьезопреобразователей // Изв. ЛЭТИ. 1968. Вып. 63. С. 60–78.
8. Степанов Б. Г. Синтез частотных характеристик широкополосных пластинчатых пьезопреобразователей путем фазирования их толщинных колебаний // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 3. С. 45–53.
9. Зайцева Н. А., Степанов Б. Г. Ультразвуковой широкополосный преобразователь с фазированным возбуждением двух образующих его пьезопластин // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 28–39.
10. Степанов Б. Г. Об излучении коротких акустических сигналов стержневыми преобразователями с фазированным возбуждением их двух частей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 8. С. 67–75.

N. A. Bystrova, B. G. Stepanov  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## PULSE OPERATION MODE OF PLATE TRANSDUCER WITH AMPLITUDE-PHASE EXCITATION OF FORMING ITS PIEZOPLATES

*The results of calculations in the pulse mode of a wideband plate transducer, containing two piezo plates separated by a passive layer and excited by different electric voltages in amplitude and phase are considered. The character of the excitation and formation of the necessary electrical signals is based on the solution of the synthesis problem, when the relations between the electrical voltages necessary for their implementation are determined by the given uniform amplitude-frequency and linear phase-frequency characteristics of the radiation. The result of solving the synthesis problem is the ability to emit in a wide frequency band short (1–1.5 oscillation periods) acoustic pulses. The influence of the limited amplitude-frequency characteristic of the radiation on the frequencies of formation of short acoustic pulses and their compliance with the specified frequencies is estimated. The influence of the design parameters and the character of loading of the plate transducer on the type of excitation pulses applied to the piezo plates is analyzed.*

**Ultrasonic transducer, amplitude-phase excitation, short acoustic pulse, synthesis problem**