АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2010, том 56, № 2, с. 284–288

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

УДК 681.883.67.001.24

СОКРАЩЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ, ИЗЛУЧАЕМЫХ ТОНКОСТЕННЫМ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИМ ЦИЛИНДРОМ, ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ЦЕПИ

© 2010 г. С. И. Коновалов, А. Г. Кузьменко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
197376 Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова 5
E-mail: silkon55@mail.ru

Поступила в редакцию 19.02.09 г.

На основе электрической схемы-аналога тонкостенного цилиндрического пьезокерамического преобразователя с подключенной к нему электрической цепью произведены расчеты формы импульсов, излучаемых в воду. Определены оптимальные параметры электрической цепи, обеспечивающие минимальные длительности импульсов, в зависимости от высоты цилиндра и относительной толщины стенки. Показано, что возможно существенное сокращение длительности сигналов, и приведены конкретные результаты расчетов.

В ряде предшествующих работ авторами исследовано влияние электрических цепей на длительность акустического импульса, излучаемого пьезопластиной в жидкие и твердые среды [1–4]. При этом для различных вариантов подключения электрических цепей получены оптимальные значения их параметров, позволяющих получить максимально короткие импульсы.

Применительно к задачам подводной акустики интерес может представить исследование импульсного режима работы тонкостенного пьезокерамического цилиндра, нагруженного на жидкость (воду). Актуальность решения подобных задач связана с повышением разрешающей способности проектируемой аппаратуры и точности определения координат подводных объектов. В данной работе, как и в упомянутых выше работах, рассматривается преобразователь с корректирующей L–R цепью, включаемой последовательно между электрическим генератором и преобразователем.

Представляет интерес исследовать влияние параметров электрической цепи на длительность акустических импульсов для различных относительных толщин и высот цилиндров, определить оптимальные параметры электрических цепей, при которых длительность импульсов будет минимальной, и получить конкретные оценки длительностей импульсов.

В настоящей работе рассмотрен воздухозаполненный излучатель в виде тонкостенного цилиндра из пьезокерамики ЦТСНВ-1, возбуждаемый импульсом электрического напряжения $U(t)$. В качестве акустической нагрузки выбрана вода. Постановка задачи приведена на рис. 1. Здесь приняты следующие обозначения: $R_{ср}$ – средний радиус цилиндра; H – высота цилиндра; δ – толщина стенки цилиндра.

Для характеристики относительной толщины стенки цилиндра введем параметр $\alpha = \dfrac{\delta}{R_{ср}}$. Относительную высоту цилиндра будем характеризовать параметром $A = \dfrac{H}{2R_{ср}}$.

Сопротивление излучения Z_S цилиндрического преобразователя имеет вид

$$Z_S = (\rho c)_в S_{бок}(x + jy),$$

где $(\rho c)_в$ – удельное акустическое сопротивление воды, а x и y – частотно зависимые безразмерные коэффициенты (активная и реактивная составляющие, соответственно); $S_{бок}$ – площадь боковой (излучающей) поверхности цилиндра.

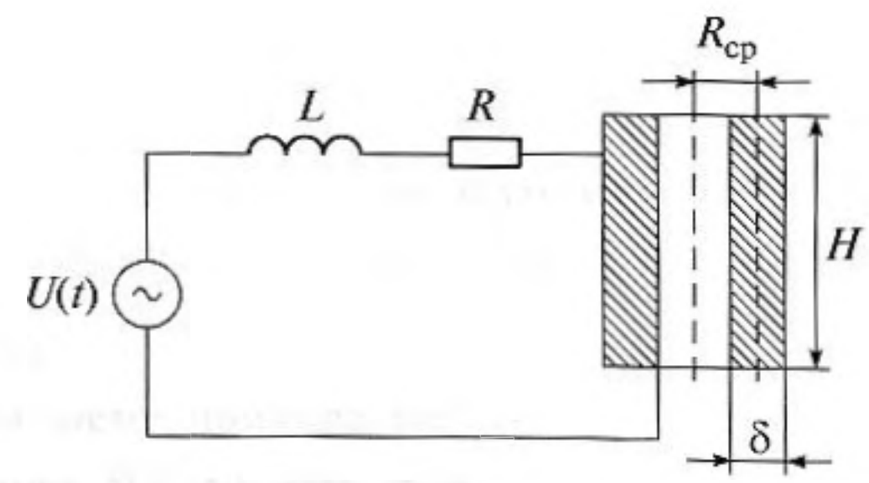

Рис. 1. Постановка задачи.

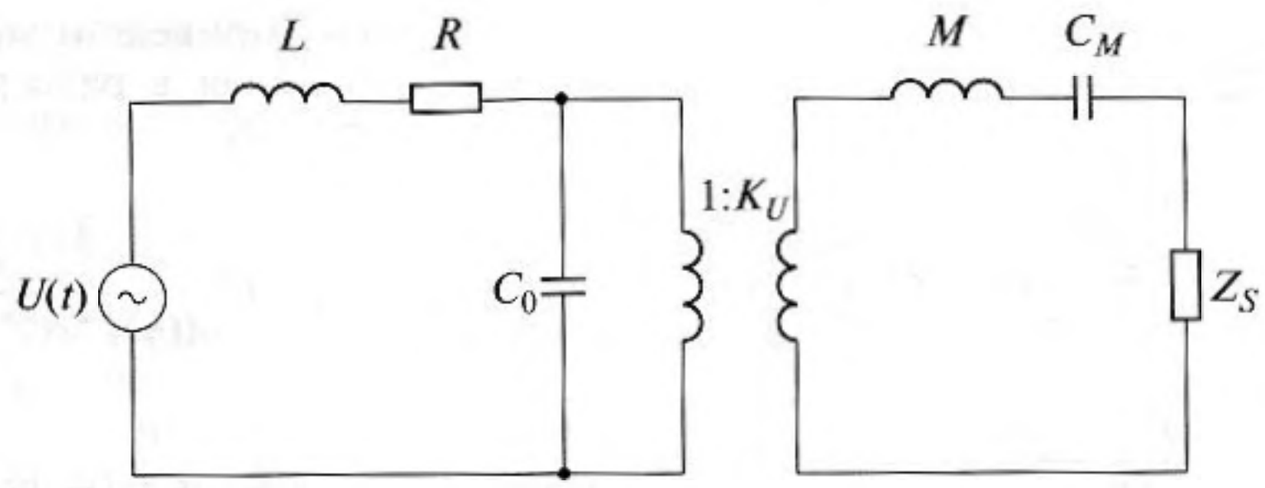

Рис. 2. Схема-аналог цилиндрического преобразователя.

Примем модель цилиндра с жесткими торцами, для которой в работе [5] приведены частотные зависимости x и y для различных значений параметра A.

На рис. 2 приведена электрическая схема-аналог тонкостенного цилиндрического пьезокерамического преобразователя, совершающего колебания на нулевой радиальной моде. Здесь M – масса пьезокерамического материала, $C_{\text{М}}$ – механическая гибкость цилиндра при радиальных колебаниях и режиме короткого замыкания электрической стороны, C_0 – электрическая емкость механически заторможенного пьезопреобразователя, K_U – коэффициент электромеханической трансформации. Корректирующая цепь представляет собой последовательное соединение элементов R и L и включена последовательно между генератором электрического напряжения и преобразователем. Индуктивность L может быть охарактеризована через резонансную частоту $\omega_{\text{эл}}$ контура, образованного элементом L и собственной емкостью C_0 излучателя:

$$\omega_{\text{эл}} = \frac{1}{\sqrt{LC_0}}.$$

Сопротивление R можно охарактеризовать параметром Q, имеющим смысл добротности:

$$Q = \frac{\omega_{\text{эл}} L}{R}.$$

Приведем выражения для параметров электрической схемы-аналога преобразователя.

Считая поляризацию преобразователя радиальной, имеем

$$K_U = \left(\frac{2\pi d_{31}}{s_{11}^E}\right) H,$$

где d_{31} – пьезомодуль; s_{11}^E – элемент матрицы гибкостей при постоянной напряженности E электрического поля. Масса $M = \rho_{\text{к}} S_{\text{бок}} \delta$; Механическая гибкость $C_{\text{М}} = \dfrac{s_{11}^E R_{\text{ср}}}{2\pi H \delta}$; $\rho_{\text{к}}$ – плотность пьезокерамики; $S_{\text{бок}} = 2\pi R_{\text{ср}} H$ – площадь излучающей поверхности цилиндра.

Резонансная частота радиальных колебаний $\omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{MC_{\text{М}}}} = \dfrac{c_1}{R_{\text{ср}}}$, где $c_1 = \dfrac{1}{\sqrt{\rho_{\text{к}} s_{11}^E}}$. Условие резонанса можно записать в виде $k_0 R_{\text{ср}} = 1$, где $k_0 = \dfrac{\omega_0}{c_1}$ – волновое число в пьезокерамике на частоте резонанса. Сопротивление излучения Z_S является функцией от $(k_{\text{в}} R)$, где $k_{\text{в}} = \dfrac{\omega}{c_{\text{в}}}$ – волновое число в воде. Введем безразмерную (относительную) частоту: $\gamma = \dfrac{\omega}{\omega_0}$. Обозначим также $b = \dfrac{c_1}{c_{\text{в}}}$. Тогда для составляющих сопротивления излучения можно получить:

$$x(k_{\text{в}} R) = x(b\gamma);\ y(k_{\text{в}} R) = y(b\gamma).$$

Механическое сопротивление кольца с учетом сопротивления излучения можно записать в виде

$$Z_{\text{мех}} = jz_{\text{к}} S_{\text{бок}} \alpha \left(\gamma - \frac{1}{\gamma}\right) + z_{\text{в}} S_{\text{бок}} \left(x(b\gamma) + jy(b\gamma)\right),$$

где $z_{\text{к}}$ и $z_{\text{в}}$ – удельные акустические сопротивления пьезокерамики и воды, соответственно.

На электрической стороне схемы-аналога для емкости C_0 можно написать следующие выражения: $C_0 = \dfrac{\varepsilon_0 \varepsilon_{33}^{u_1} S_{\text{бок}}}{R_{\text{ср}} \alpha}$; где $\varepsilon_{33}^{u_1} = \varepsilon_{33}^{\sigma}\left(1 - k_{31}^2\right)$. Здесь ε_0 – электрическая постоянная, k_{31} – коэффициент электромеханической связи пьезокерамики, $\varepsilon_{33}^{\sigma}$ – диэлектрическая постоянная при постоянном механическом напряжении.

Введем также параметр $n = \dfrac{\omega_{\text{эл}}}{\omega_0}$, характеризующей настройку электрического контура.

Для сопротивлений электрической корректирующей цепи можно получить выражения:

$$R = \frac{1}{nQ} \frac{1}{\omega_0 C_0}; \quad j\omega L = j\left(\frac{\gamma}{n^2}\right) \frac{1}{\omega_0 C_0}.$$

Далее схему-аналог, представленную на рис. 2, приведем к электрической стороне, как это пока-

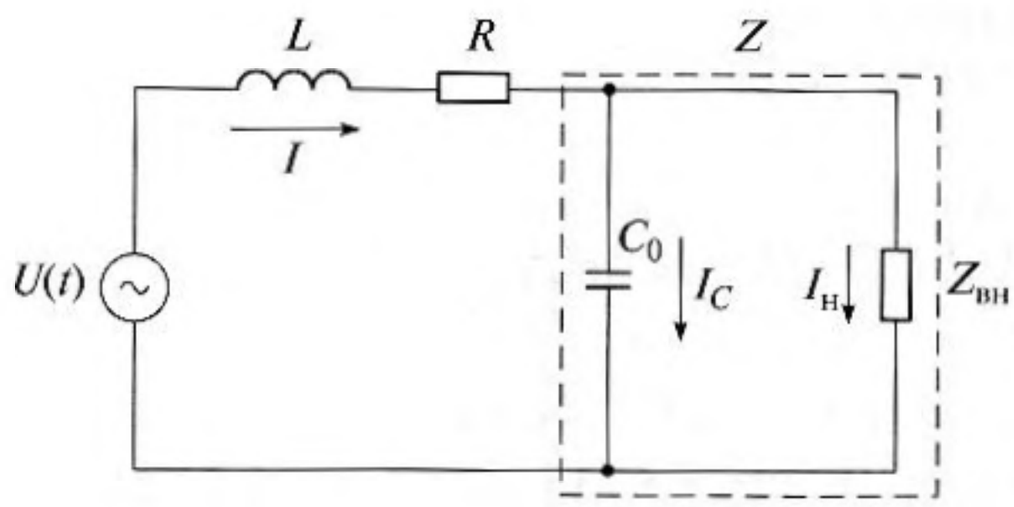

Рис. 3. Схема-аналог цилиндрического преобразователя, приведенная к электрической стороне.

зано на рис. 3. При этом механическое сопротивление "вносится" в электрическую сторону по формуле $Z_{\text{вн}} = \dfrac{Z_{\text{мех}}}{K_U^2}$.

Обозначим через Z параллельное соединение емкости C_0 и внесенного сопротивления $Z_{\text{вн}}$. Тогда получим

$$Z = \frac{Z_{\text{вн}}}{1 + j\omega C_0 Z_{\text{вн}}}.$$

Входное электрическое сопротивление пьезопреобразователя с электрической цепью

$$Z_{\text{вх}} = R + j\omega L + Z = \frac{1}{\omega_0 C_0}\left[\frac{1}{nQ} + j\frac{\gamma}{n^2} + \frac{\omega_0 C_0 Z_{\text{вн}}}{1 + j\omega C_0 Z_{\text{вн}}}\right].$$

Полный ток, протекающий через преобразователь

$$I = \frac{U}{Z_{\text{вх}}} = \frac{U\omega_0 C_0}{\dfrac{1}{nQ} + j\dfrac{\gamma}{n^2} + \dfrac{Z_{\text{вн}}\omega_0 C_0}{1 + j\omega C_0 Z_{\text{вн}}}}.$$

Ток I состоит из суммы токов: I_C – тока через емкость C_0, и тока $I_{\text{н}}$ через сопротивление $Z_{\text{вн}}$, обусловленного механической стороной преобразователя. Нужно определить ток $I_{\text{н}}$. Для этого используем коэффициент передачи

$$K = \frac{I_{\text{н}}}{\text{I}} = \frac{Z_C}{Z_C + Z_{\text{вн}}},$$

где Z_C – сопротивление емкости C_0.

Для дальнейшего используем также следующий результат:

$$\frac{K_U^2}{\omega_0 C_0} = k_{31}^2 \alpha Z_{\text{к}},$$

где $Z_{\text{к}} = z_{\text{к}} S_{\text{бок}}$.

Используя приведенные выше выражения для I, K и записывая в развернутом виде Z_C и $Z_{\text{вн}}$, можно получить

$$I_{\text{н}} = U\frac{K_U^2}{A(\gamma)k_{31}^2\alpha Z_{\text{к}} + B(\gamma)Z_{\text{мех}}},$$

где $A = \dfrac{1}{nQ} + j\dfrac{\gamma}{n^2}$, $B = 1 + j\gamma A$.

Теперь можно найти колебательную скорость на поверхности цилиндра:

$$v = \frac{I_{\text{н}}}{K_U} = \left(\frac{UK_U}{Z_{\text{к}}}\right)\frac{1}{A(\gamma)\alpha k_{31}^2 + B(\gamma)z'_{\text{мех}}},$$

где $z'_{\text{мех}} = \dfrac{Z_{\text{мех}}}{Z_{\text{к}}} = j\alpha\left(\gamma - \dfrac{1}{\gamma}\right) + \left(\dfrac{z_{\text{в}}}{z_{\text{к}}}\right)\left(x(b\gamma) + jy(b\gamma)\right)$.

Теперь, когда получена частотная зависимость колебательной скорости $v(\gamma)$, можно перейти к рассмотрению импульсного режима работы. Для расчета формы импульса используем обратное преобразование Фурье. При этом, кроме безразмерной частоты γ, введем также безразмерное время $T = \dfrac{t}{(T_0/2)}$, где t – обычное время, а T_0 – период колебаний преобразователя на собственной частоте ω_0.

Тогда, с точностью до постоянного множителя, можно получить выражение зависимости колебательной скорости от времени:

$$v(T) = \text{Re}\int_0^\infty U(\gamma)\ v(\gamma)e^{j\gamma\pi T}d\gamma,$$

где $U(\gamma)$ – спектральная плотность возбуждающего электрического импульса.

В данной работе используется импульс электрического напряжения в виде полупериода синусоиды на частоте ω_0:

$$U(t) = \begin{cases} U_m \sin\omega_0 t, & \text{при } 0 \le t \le T_0/2 \\ 0, & \text{при } t < 0 \text{ и } t > T_0/2 \end{cases}.$$

Выполняя прямое преобразование Фурье для $U(t)$ и переходя к безразмерным переменным, получаем спектральную плотность

$$U(\gamma) = \frac{\cos\left(\gamma\dfrac{\pi}{2}\right)}{1 - \gamma^2}\ e^{-j\gamma\frac{\pi}{2}}.$$

При $\gamma = 1$, т.е. на частоте резонанса ω_0, для модуля $U(\gamma)$ получаем неопределенность вида $\frac{0}{0}$, что после раскрытия дает $|U(\gamma)|_{\gamma=1} = \frac{\pi}{4}$.

На основании полученных выше формул производились расчеты акустических импульсов колебательной скорости для воздухозаполненного тонкостенного цилиндра из пьезокерамики ЦТСНВ-1. Длительность излучаемого сигнала определялась промежутком времени, прошедшим от начала импульса до момента снижения амплитуды в 10 раз (на 20 дБ) по сравнению с максимальным значением амплитуды в импульсе. Напомним, что длительность $\tau_и$ импульса определялась безразмерным временем – числом полупериодов колебаний на резонансной частоте радиальных колебаний цилиндра.

Расчеты производились для относительно "длинного" цилиндра ($A = 2.5$) и достаточно "короткого" цилиндра ($A = 0.5$). Относительная толщина стенки принималась равной $\alpha = 0.15$ и $\alpha = 0.25$, что позволяло считать цилиндр достаточно тонкостенным.

На первоначальном этапе решения задачи с помощью многочисленных систематических расчетов (по существу, методом перебора) определялись примерные области значений параметров n и Q, при которых наблюдалось существенное снижение длительностей излучаемых импульсов. В дальнейшем эти значения уточнялись. В результате определялись пары оптимальных значений параметров n и Q, при которых длительность излучаемых сигналов минимальна. В таблице приведены оптимальные значения n и Q для указанных выше вариантов и соответствующие им длительности $\tau_и$ импульсов и максимальные значения их амплитуд v_{max} (в условных единицах), а также значения этих величин при отсутствии корректирующей электрической цепи.

Использование корректирующей электрической цепи с оптимальными параметрами, как показал расчет, позволяет существенно снизить длительность акустического сигнала на выходе преобразователя. При этом также следует заметить, что относительное изменение длительности импульса тем больше, чем более продолжительным является импульс без использования корректирующей цепи, т.е. чем более коротким является цилиндр и чем большую относительную толщину стенки он имеет. Так, при $A = 2.5$ и $\alpha = 0.15$ длительность уменьшается в 1.2 раза, а при $\alpha = 0.25$ в 1.32 раза. При $A = 0.5$ и $\alpha = 0.15$ длительность уменьшается в 1.76 раза, а при $\alpha = 0.25$ в 2.39 раза.

В качестве примера на рис. 4 приведен вид акустического импульса при $A = 0.5$ и $\alpha = 0.15$

Таблица

A	α	При подключении L–R-цепи с оптимальными параметрами		Без L–R-цепи
2.5	0.15	$n_{опт} = 1.25$ $Q_{опт} = 1.5$	$\tau_и = 4.3$ $v_{max} = 11.6$	$\tau_и = 5.2$ $v_{max} = 9.1$
	0.25	$n_{опт} = 1.1$ $Q_{опт} = 1.5$	$\tau_и = 5.3$ $v_{max} = 7.9$	$\tau_и = 7$ $v_{max} = 6.8$
0.5	0.15	$n_{опт} = 1$ $Q_{опт} = 1.5$	$\tau_и = 6.8$ $v_{max} = 12$	$\tau_и = 12$ $v_{max} = 10.2$
	0.25	$n_{опт} = 0.95$ $Q_{опт} = 2$	$\tau_и = 6.6$ $v_{max} = 9.12$	$\tau_и = 15.8$ $v_{max} = 7.5$

(рис. 4, а – без электрической цепи, рис. 4, б – с оптимальной электрической цепью). Аналогично на рис. 5 приведен вид импульса при $A = 0.5$ и $\alpha = 0.25$. По осям абсцисс на рис. 4 и рис. 5 отложено безразмерное время T, по осям ординат – нормированные значения колебательной скорости в импульсе v/v_{max}. На приведенных рисунках из

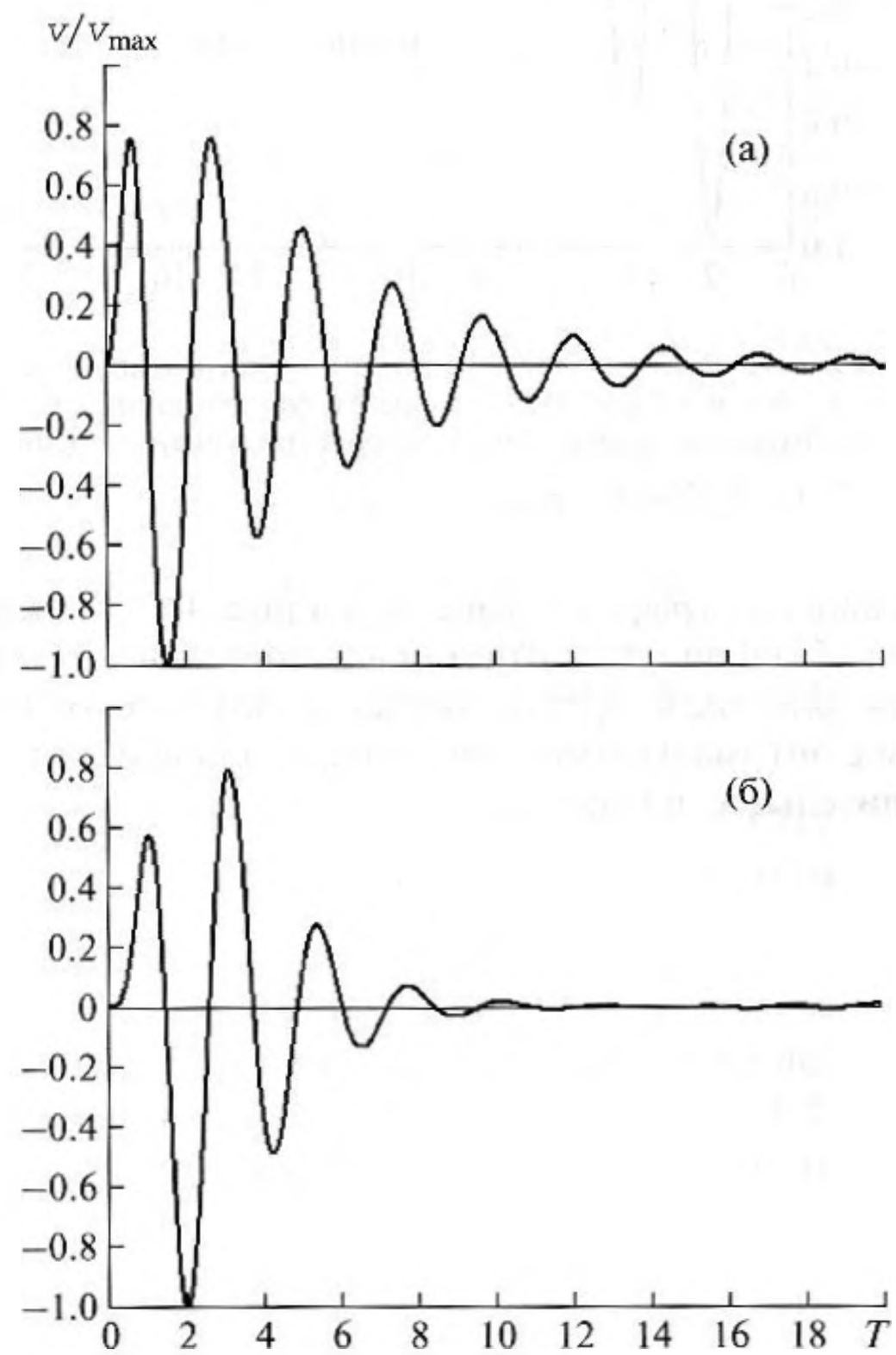

Рис. 4. Вид излучаемого акустического импульса ($A = 0.5; \alpha = 0.15$): а) без корректирующей цепи; б) с оптимально подобранной корректирующей цепью ($n_{опт} = 1; Q_{опт} = 1.5$).

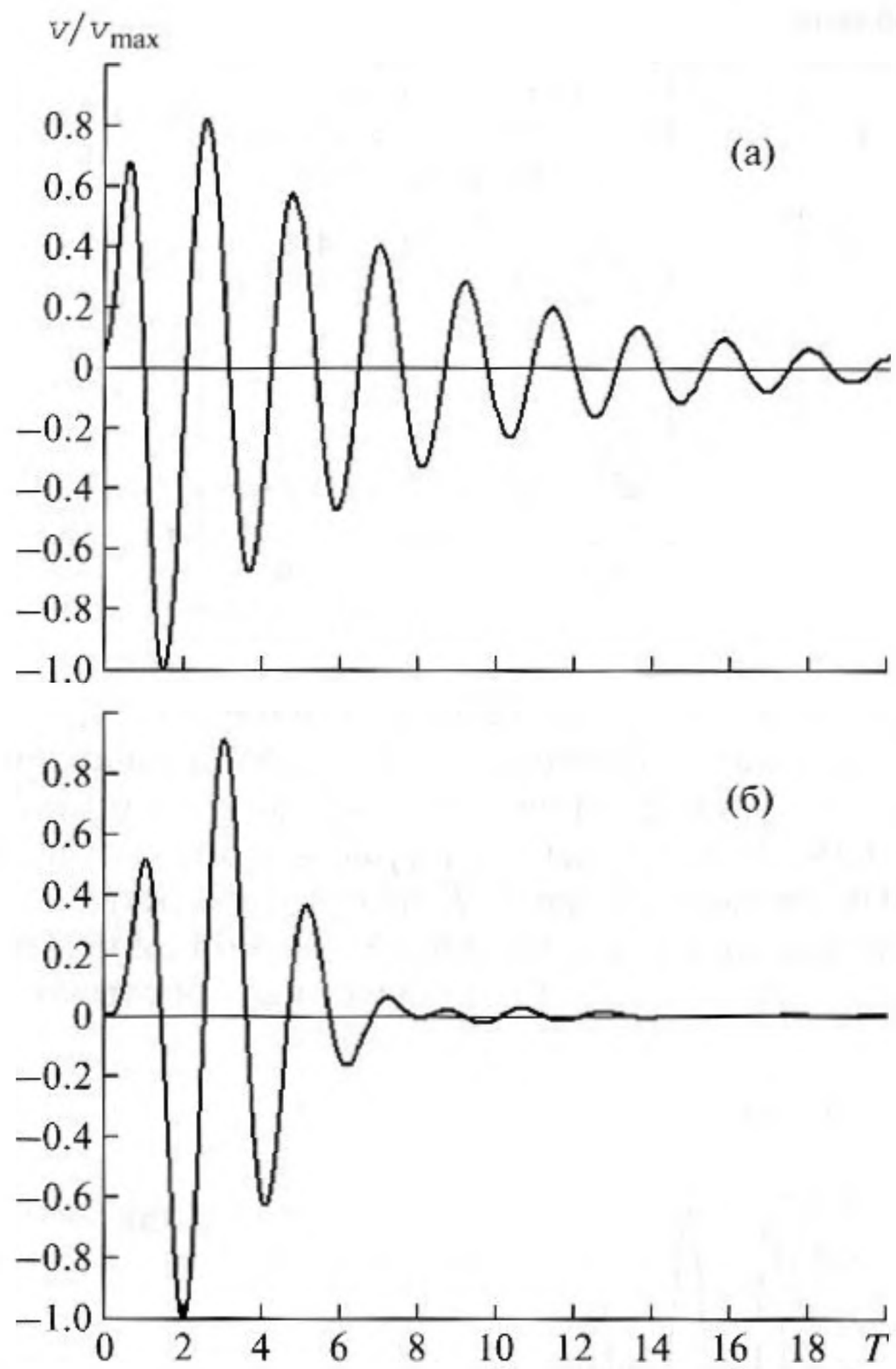

Рис. 5. Вид излучаемого акустического импульса ($A = 0.5; \alpha = 0.25$): а) без корректирующей цепи; б) с оптимально подобранной корректирующей цепью ($n_{опт} = 0.95; Q_{опт} = 2$).

сравнения графиков (рис. 4, а и рис. 4, б, а также рис. 5, а и рис. 5, б) отчетливо видно положительное влияние корректирующей электрической цепи с оптимальными параметрами на уменьшение длительности импульса.

Можно также отметить, что применение электрической корректирующей цепи с оптимальными параметрами приводит к увеличению амплитуды излучаемого сигнала v_{max} приблизительно на 20%, что можно при коротких импульсах объяснить более быстрым нарастанием амплитуды за счет меньшей механической добротности, по сравнению со случаем отсутствия электрической цепи.

Таким образом, с помощью численного расчета исследован импульсный режим работы тонкостенного цилиндрического пьезоэлектрического преобразователя при нагрузке на воду. Показано, что правильный выбор параметров корректирующей цепи позволяет существенно снизить длительность излучаемых акустических импульсов. При этом с ростом относительной толщины стенки цилиндра эффект воздействия цепи на длительность сигнала является более выраженным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коновалов С.И., Кузьменко А.Г.* Сокращение длительности импульса пьезоизлучателя при различных вариантах включения компенсирующих *RL*-цепей // Дефектоскопия. 2008. №5. С. 79–87.
2. *Коновалов С.И., Кузьменко А.Г.* Импульсный режим работы пьезоизлучателя с корректирующей *RL*-цепочкой // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 4. С. 682–685.
3. *Коновалов С.И., Кузьменко А.Г.* Влияние электрической нагрузки на длительность акустического импульса, излучаемого пьезопластиной // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 1. С. 129–130.
4. *Коновалов С.И., Кузьменко А.Г.* Исследование возможности получения короткого акустического импульса при подключении индуктивно-резистивной цепи на вход излучателя, нагруженного на твердое тело через контактный слой // Дефектоскопия. 2004. № 11. С. 15–21.
5. *Шендеров Е.Л.* Излучение и рассеяние звука. Л.: Судостроение, 1989. 304 с.