

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2021»

О возможном пути снижения длительности зондирующего сигнала в применении к задаче исследования водной среды

Коновалов Р.С.^{1,2}, Коновалов С.И.¹, Кузьменко А.Г.¹, Павлов И.В.¹, Цаплев В.М.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 197376, ул. Проф. Попова 5, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail.: sikonovalov.eut@gmail.com

Tel: +7 (812) 234-37-26, Fax: +7 (812) 234-37-26

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, Московский пр., д. 9, Санкт-Петербург, Россия.

Рассмотрен импульсный режим работы пьезоэлектрического излучателя в виде тонкостенной сферы с подключенной к ней индуктивно-резистивной нагрузкой. Излучение осуществляется в водную среду. Возбуждающий электрический сигнал принят в виде полупериода синусоиды на частоте резонанса сферы. Показана возможность снижения длительности зондирующих сигналов за счет применения RL-цепи с оптимально определенными параметрами. Для тонкостенной сферы с различной относительной толщиной стенки проведено сравнительное исследование длительностей зондирующих сигналов с корректирующей цепью и без нее.

Ключевые слова: сферический пьезокерамический преобразователь, акустический зондирующий импульс, электрический импульс, электрическая корректирующая цепь

Possible way to reduce the duration of the probing acoustic pulse to study the underwater environment

Konovarov R.S.^{1,2}, Konovarov S.I.¹, Kuz'menko A.G.¹, Pavlov I.V.¹, Tsaplev V.M.¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

² Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University

The pulsed mode of operation of a piezoelectric transducer in the form of a thin-walled sphere with an inductive-resistive load connected to it is considered. Radiation is carried out in the water environment. The exciting electric signal is received in the form of a half-cycle of a sinusoid at the resonance frequency of the sphere. The possibility of reducing the duration of probing signals by using an RL circuit with optimally defined parameters is shown. For a thin-walled sphere with different relative wall thickness, a comparative study of the durations of probing signals with and without a correction circuit is carried out.

Keywords: spherical piezoceramic transducer, probing acoustic pulse, electrical pulse, electrical correction circuit

Введение

Акустические методы исследования различных физических сред по праву получили широкое распространение. В этом смысле морская среда не является исключением. В связи с этим созданию гидроакустических средств изучения Мирового Океана уделяется самое серьезное внимание в нашей стране и за рубежом. Разработчики аппаратуры, предназначенной для подводных исследований, постоянно стремятся к улучшению ее характеристик. Так, например, в задачах локационного характера решение этой проблемы становится возможным за счет снижения длительности зондирующих акустических импульсов, излучаемых пьезопреобразователями (ПЭП) во внешнюю среду (воду). Действительно, работа ПЭП в режиме излучения/приема короткого сигнала позволяет повышать точность

определения координат изучаемых объектов, а также способствовать улучшению разрешающей способности излучающей системы. Иными словами, создание условий, позволяющих пьезопреобразователям работать в импульсном режиме, является одним из основных направлений решения ряда актуальных задач гидроакустики (поиск целей, их классификация, решение задач подводного позиционирования, навигации и др.). Следует отметить, что во многих случаях снижение длительности зондирующих сигналов достигается за счет применения тех же технических средств, которые используют для расширения полосы пропускания ПЭП. Вероятно, данное обстоятельство является причиной того, что иногда приходится сталкиваться с тем, что возникает смешивание двух задач, совершенно различных по своей физической сути, – создание широкополосного ПЭП и исследование импульсного режима его работы. Первая задача является результатом анализа непрерывного режима работы преобразователя, причем этот результат может быть распространен на случай излучения/приема длинных импульсных сигналов. Вторая задача может решаться только применением специальных методов, позволяющих исследовать форму сигналов на выходе ПЭП [1]. Среди методов расширения полосы пропускания преобразователей и, соответственно, снижения длительности излучаемого сигнала, наибольшее распространение получили: механическое демпфирование, применение четвертьволновых согласующих слоев и подключение к электрической стороне ПЭП индуктивно-резистивных цепей [2–4].

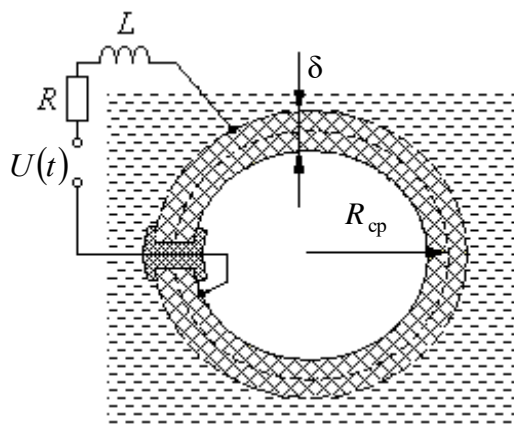


Рис. 1. Схематичное представление задачи

Первый из названных способов в гидроакустике практического применения не нашел в силу отсутствия материалов, способных эффективно поглощать сигналы на частотах, применяемых в подводных исследованиях. Согласующие четвертьволновые слои используются достаточно широко. К их недостаткам можно отнести необходимость соблюдения высокой точности их изготовления для достижения идентичности параметров ПЭП. В меньшей мере изучен метод подключения к электрической стороне ПЭП индуктивно-резистивных цепей. В ряде предшествующих работ [5, 6] авторами проведено исследование импульсного режима работы различных преобразователей и определены параметры подключаемых к электрической стороне ПЭП индуктивно-резистивных цепей, позволяющие получать минимальную длительность излучаемых акустических импульсов. Так, в работе [5] изучена возможность снижения длительностей зондирующих сигналов при последовательных и параллельных вариантах подключения к пластинчатому ПЭП последовательных и параллельных RL -цепей. Работа тонкостенного пьезоцилиндра с подключенной к нему индуктивно-резистивной цепью исследована в [6].

Следует отметить что применительно к задачам подводной акустики, не требующим использования направленных излучателей, иногда перспективным может оказаться применение сферического тонкостенного преобразователя. Работа такого ПЭП в импульсном режиме изучена в [7], где рассмотрена сфера с жидкостным заполнением внутренней полости (с целью увеличения глубоководности преобразователя). Как частный вариант, в работе исследована и сфера без заполнения. Представляет интерес дальнейшее развитие этих исследований путем рассмотрения работы в импульсном режиме сферического излучателя с подключенной к нему RL -цепью с целью изучения возможности сокращения длительности зондирующего импульса. Результаты изучения этого вопроса представлены в настоящей работе.

Постановка задачи

Задача решается в постановке, приведенной на рис. 1, где показан излучатель, имеющий форму тонкостенной пьезосферы, выполненной из пьезокерамики ЦТСНВ-1. Излучение осуществляется в водную среду. К электрическому входу излучателя подключена индуктивно-резистивная цепь. На рисунке приняты следующие обозначения: $U(t)$ – возбуждающий электрический импульс; R_{cp} – средний радиус сферы, δ – толщина стенки. Введем параметр α , с помощью которого будем характеризовать относительную толщину стенки сферы: $\alpha = \delta/R_{cp}$. Задача состоит в определении формы зондирующего сигнала, излучаемого рассматриваемым преобразователем (при задании вида возбуждающего электрического импульса).

Пусть C_0 – электрическая емкость механически заторможенного пьезоэлектрического преобразователя. Индуктивность L и собственная емкость пьезоэлемента C_0 образуют контур, резонансная частота которого $\omega_{эл} = 1/\sqrt{LC_0}$ может быть использована для характеристики индуктивности L . Сопротивление R можно охарактеризовать параметром $Q = \omega_{эл}L/R$. Данный параметр имеет смысл добротности. Введем также параметр $n = \omega_{эл}/\omega_0$, который характеризует настройку электрического контура LC_0 .

В предшествующей работе авторов [6] был разработан и подробно описан алгоритм определения формы зондирующего сигнала, излучаемого преобразователем в виде тонкостенного пьезоцилиндра. Данная методика вполне может быть применена и для тонкостенного сферического излучателя. При этом нецелесообразно вновь описывать ее. Отметим лишь, что для определения сигнала на выходе ПЭП использован метод схем-аналогов пьезопреобразователей и спектральный метод Фурье. Форма возбуждающего электрического сигнала предполагалась следующей:

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

т.е. в виде полупериода синусоиды на частоте резонанса сферы ω_0 . При решении задачи для большей общности использованы безразмерные (относительные) переменные, а именно: безразмерная частота $\gamma = \omega/\omega_0$ и безразмерное время $T = t/(T_0/2)$, где t – обычное время, а T_0 – период колебаний преобразователя на собственной частоте ω_0 . Определив, в соответствии с [6], частотную зависимость $v(\gamma)$ колебательной скорости на выходе ПЭП, можно (с точностью до постоянного множителя) определить зависимость колебательной скорости от времени в излучаемом

зондирующем сигнале: $v(T) = \operatorname{Re} \int_0^{\infty} U(\gamma) v(\gamma) e^{j\gamma\pi T} d\gamma$, где $U(\gamma)$ – спектральная плотность

возбуждающего электрического импульса.

Применение кратко описанной выше методики позволило провести расчетно-теоретическое исследование формы акустических сигналов, излучаемых рассматриваемым сферическим ПЭП с подключенной к нему электрической индуктивно-резистивной цепью. При этом длительность акустических зондирующих сигналов определялась в соответствии с критерием (– 20) дБ.

Результаты решения задачи

Далее приводятся некоторые результаты численных исследований. Они заключались в проведении значительного объема расчетов, которые для различных значений параметра α проводились методом перебора и сводились к определению значений параметров n и Q , при которых возможно получение зондирующего сигнала наименьшей длительности. Пары значений n и Q , позволяющих добиваться этой цели, принимались за оптимальные. Диапазон изменения параметра α выбирался из требований тонкостенности сферы, что соответствует нижней и верхней границам: $\alpha = 0,01$ и $\alpha = 0,2$, соответственно.

В процессе проведения расчетного исследования установлено, что наличие RL -цепи действительно способствует снижению длительностей зондирующих сигналов в случае, при котором $\alpha > (0,06 - 0,07)$. С целью иллюстрации этого положения можно обратиться к рис. 2. Он содержит несколько видов зондирующих акустических сигналов для случаев отсутствия RL -цепи (рис. 2,а и б) и ее наличия при оптимально рассчитанных значениях параметров n и Q (рис. 2,в и г). При этом рис. 2,а и 2,в соответствуют варианту, при котором $\alpha = 0,1$, а рис. 2,б и г – варианту, при котором $\alpha = 0,2$. Сравнивая попарно рис. 2,а и рис. 2,в, а также рис. 2,б и рис. 2,г. можно убедиться в том, что применение RL -цепи с оптимально определенными параметрами n и Q , позволяет для $\alpha = 0,1$ достигать снижения сигнала $\tau_{\text{н}}$ в 1,25 раза (от $\tau_{\text{н}} = 5$ до $\tau_{\text{н}} = 4$). Для варианта, подразумевающего $\alpha = 0,2$, эффект от применения электрической коррекции выражен более заметно (от $\tau_{\text{н}} = 9,8$ до $\tau_{\text{н}} = 6$, т. е. примерно в 1,6 раза). Интересно также отметить, что наличие электрической нагрузки не искажает формы зондирующих сигнала, что можно наблюдать из данных, приведенных на рис. 2.

В таблице представлены некоторые результаты расчетной работы по исследованию положительного влияния электрической корректирующей цепи с оптимально определенными параметрами n и Q (они приведены в таблице) на длительность $\tau_{\text{н}}$ и максимальную амплитуду v_{max} зондирующих сигналов. Стоит отметить, что параметр v_{max} измеряется в относительных (безразмерных) единицах, пропорциональных колебательной скорости в излучаемом сигнале. Это объясняется решением задачи с точностью до постоянного множителя. Представленный в таблице диапазон изменения относительной толщины стенки сферы весьма широк – от $\alpha = 0,05$ до $\alpha = 0,20$. Из приведенных данных следует, что подключение к сферическому преобразователю электрической нагрузки может способствовать некоторому снижению длительности зондирующих сигналов в сравнении со случаем ее отсутствия.

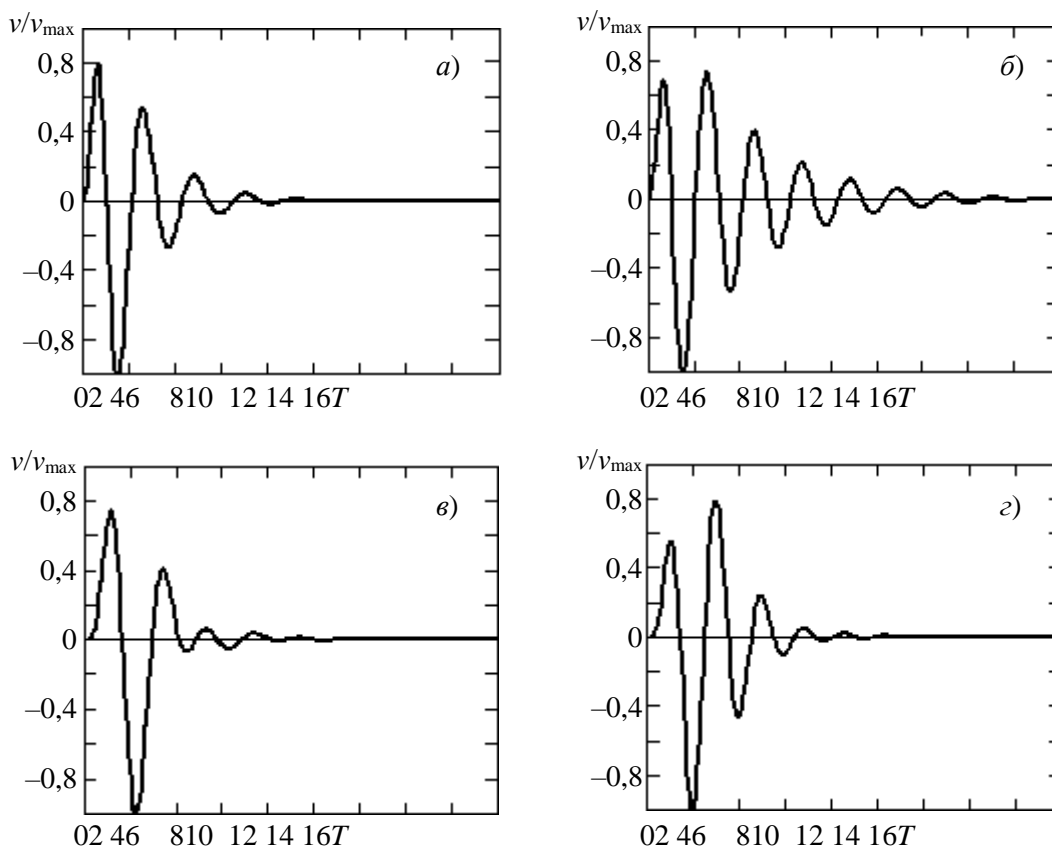


Рис. 2. Вид излучаемых акустических сигналов без корректирующей цепи (а, б) и при наличии цепи с оптимально подобранными параметрами (в, г)

Таблица. Основные параметры зондирующих сигналов для случаев излучателя без цепи и с рассчитанной оптимальной цепью

α	При подключении RL -цепи с оптимальными параметрами		Без RL -цепи
0,05	$n_{\text{опт}} = 2$ $Q_{\text{опт}} = 1,5$	$\tau_{\text{и}} = 3,3$ $v_{\text{max}} = 1,18$	$\tau_{\text{и}} = 3,3$ $v_{\text{max}} = 0,94$
0,10	$n_{\text{опт}} = 0,65$ $Q_{\text{опт}} = 1,2$	$\tau_{\text{и}} = 4$ $v_{\text{max}} = 0,85$	$\tau_{\text{и}} = 5$ $v_{\text{max}} = 1,44$
0,15	$n_{\text{опт}} = 1$ $Q_{\text{опт}} = 1,5$	$\tau_{\text{и}} = 5,2$ $v_{\text{max}} = 1,86$	$\tau_{\text{и}} = 7$ $v_{\text{max}} = 1,70$
0,20	$n_{\text{опт}} = 1$ $Q_{\text{опт}} = 1,5$	$\tau_{\text{и}} = 6$ $v_{\text{max}} = 2,0$	$\tau_{\text{и}} = 9,8$ $v_{\text{max}} = 1,85$

Следует отметить, что при проведении расчетного исследования было установлено, что при значениях $\alpha > (0,06 - 0,07)$ положительного эффекта от применения электрической нагрузки не наблюдается.

Заключение

В работе проведено исследование импульсного режима работы сферического ПЭП, излучающего короткие сигналы в воду. Показана возможность снижения длительности зондирующих сигналов за счет подключения к преобразователю RL -цепи с оптимальными параметрами. Данные параметры определены для широкого диапазона значений относительных толщин стенки пьезокерамической сферы. Осуществлены

сравнительные оценки длительностей и амплитуд зондирующих импульсов при наличии и отсутствии корректирующей цепи.

Литература

1. Гитис М. Б. Преобразователи для импульсной ультразвуковой дефектоскопии. Основные теоретические положения // Дефектоскопия, 1981, № 2, С.65–84.
2. Кескюла А.Ю. Способы увеличения широкополосности акустического тракта дефектоскопических устройств // Дефектоскопия, 1975, №3, С.50–61.
3. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974. – 256 с.
4. Королев М. В., Карпельсон А. Е. Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М.: Машиностроение, 1982. – 157 с.
5. Konovalov S.I., Kuz'menko A.G.. Effect of electrical circuits on duration of an acoustic pulse radiated by a piezoplate // J. Acoust. Soc. Am., 2009, Vol.125, Is.3, 1456–1460.
6. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Сокращение длительности импульсов, излучаемых тонкостенным пьезокерамическим цилиндром, при помощи электрической корректирующей цепи // Акустич. журнал, 2010, Т.56, №2, С.284–288.
7. И Б.Ч., Коновалов Р.С., Коновалов С.И., Кузьменко А.Г., Цаплев В.М. Исследование длительности акустического сигнала на выходе излучателя для дистанционного зондирования водной среды. – Всероссийские открытые Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. – Муром: 23–25 июня 2020 г. – Изд.-полиграфический центр МИВлГУ, 2020, С.190–199.