

Управление выходным сигналом пьезопреобразователя для подводных исследований

Коновалов С.И.¹, Коновалов Р.С.^{1,2}, Коновалова В.С.^{1,3}, Цаплев В.М.¹

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

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

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

³ АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А

Применительно к задаче исследования состояния промышленных подводных объектов рассмотрена задача управления формой зондирующих акустических сигналов, излучаемых пьезопреобразователем в водную среду. Проведено сравнительное исследование двух возможных вариантов – применения механического демпфирования пьезоэлемента и использования корректирующих электрических цепей, подключаемых к электрической стороне преобразователя. Решение задачи рассмотрено для случая возбуждения пьезоэлемента электрическими сигналами различной длительности. Определены параметры электрической цепи, позволяющие добиваться минимальной длительности зондирующего импульса. Сделаны выводы об эффективности рассматриваемых способов решения задачи.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, акустический зондирующий импульс, корректирующая электрическая цепь

Controlling the parameters of probing signals of an underwater piezoelectric transducer

S.I. Konovalov¹, R.S. Konovalov^{1,2}, V.S. Konovalova^{1,3}, V.M. Tsaplev¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”.

² Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University.

³ JSC Radar mms.

In relation to the problem of studying the state of industrial underwater objects, the problem of controlling the shape of probing acoustic signals emitted by a piezoelectric transducer into an aqueous medium is considered. A comparative study of two possible options has been carried out – the use of mechanical damping of the piezoelectric element and the use of corrective electrical circuits connected to the electrical side of the converter. The solution of the problem is considered for the case of excitation of a piezoelectric element by electrical signals of different duration. The parameters of the electrical circuit that allow achieving the minimum duration of the probing pulse are determined. Conclusions are drawn about the effectiveness of the considered methods of solving the problem.

Keywords: piezoelectric transducer, acoustic probing pulse, corrective electrical circuit

Введение

При коммерческом освоении ресурсов Мирового Океана в настоящее время все активнее используются разнообразные системы добычи полезных ископаемых, не предполагающие участия человека в этом процессе. Пример подобного комплекса, предназначенного для добычи полезных ископаемых, размещенный на морском дне, приведен на рис. 1. С целью надежного функционирования данные комплексы снабжаются различными системами пассивной и активной защиты. При этом

мониторинг их состояния ведется, в том числе, и автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА, рис. 1). Управление движением АНПА при сложном рельефе морского дна и необходимость осуществления их позиционирования в пространстве среди разнообразных технических устройств добычи, требуют создания многоканальных средств их ориентации в пространстве. При этом системы ориентации могут строиться на различных физических принципах: оптических, акустических и др. Широкое распространение в настоящее время получили системы позиционирования с использованием гидроакустических пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), предполагающих измерение временной задержки между излученным и принятым акустическим сигналами. В задачах локационного характера чрезвычайно важным при этом становится управление параметрами импульсной характеристики излучаемого сигнала. В первую очередь это относится к амплитуде и длительности зондирующего акустического импульса. Снижение его длительности позволяет повышать точность подводного позиционирования АНПА, сокращать мертвую зону, а также способствовать улучшению разрешающей способности излучающей системы АНПА. Иными словами, создание условий, позволяющих ПЭП работать в режиме излучения-приема короткого сигнала, является одним из основных направлений, способствующих решению ряда актуальных задач прикладной гидроакустики, улучшающих управляемость АНПА в сложных условиях вблизи технических сооружений. В конечном итоге, это приводит к снижению вероятности возникновения аварийных ситуаций, последствием которых может явиться не только разрушение АНПА и повреждение комплекса подводной добычи ископаемых, но и возникновение техногенных катастроф.



Рис. 1. Аппаратный комплекс подводной добычи полезных ископаемых

Чувствительным элементом каждого из каналов АНПА являются ПЭП. Управление режимами работы ПЭП, их частотными и направленными свойствами и др. достигается за счет специальных методов коррекции его конструктивных характеристик (механическое демпфирование, применение четвертьволновых согласующих слоев, управление входным электрическим сигналом, подключение к электрической стороне ПЭП индуктивно-резистивных цепей или управлением формой входного возбуждающего электрического сигнала [1, 2]. Механическое демпфирование в гидроакустических ПЭП (например, стержневого типа) не нашло практического применения 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.

Стоит отметить, что в качестве ПЭП могут использоваться преобразователи различной геометрической формы – стержни, цилиндры, сферы, пластины и т.д. АНПА предназначены для работы в непосредственной близости от устройств добычи ископаемых, которые зачастую представляют собой комплекс различных аппаратов, сконцентрированных на ограниченной площади морского дна. В связи с этим на первый план выходит решение задач точного подводного позиционирования АНПА.

Данное обстоятельство требует использования ПЭП, например, пластинчатого типа, позволяющих работать в более высокочастотном диапазоне, нежели другие типы ПЭП (например, стержневые, которые часто используются в гидроакустике).

В предшествующих работах авторов [3, 4] исследован импульсный режим работы ПЭП в виде пьезопластины, нагруженной на водную среду. Так, в работе [3] изучено влияние электрических корректирующих индуктивно-резистивных цепей на длительность зондирующего акустического импульса, излучаемого ПЭП при его возбуждении сигналом в виде полупериода синусоиды на собственной частоте пластины. В [4] основное внимание уделялось исследованию влияния длительности возбуждающих электрических сигналов на длительность и амплитуду зондирующего импульса. Представляет интерес дальнейшее развитие начатых ранее исследований. Некоторые результаты этой работы представлены ниже.

Постановка задачи

На рис. 2 представлено схематичное изображение пьезопреобразователя пластинчатого типа. В качестве активного материала пластины выбрана пьезокерамика ЦТСНВ-1. Акустической нагрузкой выступает водная среда. Тыльная сторона пластины контактирует с воздухом. Последовательно с пьезоэлементом к электрической стороне ПЭП подключена последовательная индуктивно-резистивная нагрузка (корректирующая RL -цепь). Подключение данной цепи осуществляется с целью расширения полосы пропускания преобразователя и снижения длительности зондирующего акустического сигнала на выходе ПЭП. Будем предполагать, что электрическое возбуждение ПЭП осуществляется электрическим напряжением $U(t)$ с длительностью, кратной длительности полупериода синусоиды на частоте антирезонанса пластины ω_0 . Исследование импульсного режима работы такого ПЭП, но без корректирующей цепи, осуществлено в [4]. Для исследования импульсного режима работы пластинчатого преобразователя совместно с электрической корректирующей цепью представляется целесообразным ввести некоторые параметры, с помощью которых можно охарактеризовать описываемую излучающую систему:

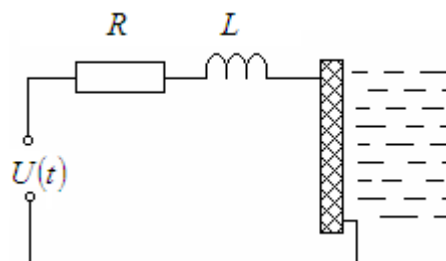


Рис. 2. Постановка задачи

$$\omega_{эл} = \frac{1}{\sqrt{LC_0}}; \quad n = \frac{\omega_{эл}}{\omega_0}; \quad Q = \frac{\omega_{эл}L}{R},$$

где C_0 – электрическая емкость заторможенной пластины; ω_0 – антирезонансная частота пластины. Индуктивность L совместно с емкостью пластины C_0 образуют электрический контур. Пусть $\omega_{эл}$ является его резонансной частотой. Тогда можно считать параметр n относительной резонансной частотой этого контура. Смысл электрической добротности выполняет параметр Q .

Как и в работе [4], будем полагать, что сигнал, возбуждающий ПЭП, может быть задан в следующем виде:

$$U(t) = \begin{cases} \sin \omega_0 t, & \text{если } 0 \leq t \leq \frac{mT_0}{2} \\ 0, & \text{если } t \notin \left[0, \frac{mT_0}{2}\right], \end{cases},$$

где T_0 – период колебаний пьезопластины на собственной частоте, m – число полупериодов в импульсе.

Решение задачи должно подразумевать определение формы зондирующего сигнала на выходе ПЭП, а также нахождение значений параметров n и Q , при которых зондирующий импульс имеет наименьшую длительность при задаваемом виде возбуждающих ПЭП сигналов.

Краткое описание алгоритма решения задачи. Обсуждение результатов расчетного исследования.

Решение задачи может быть осуществлено в соответствии с методикой, описанной в [3, 4], базирующейся на определении частотной характеристики ПЭП (с подключенной цепью) на основе применения схем-аналогов ПЭП в сочетании с использованием спектрального преобразования Фурье. Так, временная зависимость колебательной скорости в излучаемом импульсе может быть представлена в виде:

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

где $F(\gamma\pi)$ представляет собой частотную характеристику рассматриваемой системы; $\gamma = \omega/\omega_0$ – безразмерная частота; $U(\gamma)$ – спектральная плотность импульса электрического возбуждения; $T = \frac{t}{(T_0/2)}$ – безразмерное время, необходимое для решения задачи в наиболее общей форме.

В процессе решения задачи длительность зондирующего сигнала τ_n определялась в соответствии с критерием (– 20) дБ.

Ниже представлены основные результаты расчетной работы.

При проведении расчетного исследования было обнаружено, что значения параметров n и Q , при которых длительности зондирующих сигналов являются минимальными, примерно одинаковы при возбуждении ПЭП электрическими сигналами различной длительности. Они оказались следующими: $n_{\text{опт}} = 1,15$ и $Q_{\text{опт}} = 1,5$.

Расчетные зависимости максимальных амплитуд колебательных скоростей зондирующих сигналов v_{max} от числа полупериодов m в возбуждающем электрическом импульсе представлены на рис. 3,а. При этом стоит отметить, что определение v_{max} осуществлялось с точностью до постоянного множителя, поэтому по оси ординат значения v_{max} отложены в условных единицах (безразмерных). На рисунке принята следующая нумерация кривых: 1 – пьезопластина без корректирующей цепи; 2 – пластина с подключенной к ней цепью, причем $n_{\text{опт}} = 1,15$ и $Q_{\text{опт}} = 1,5$. При малых значениях m ($m = 1...3$) не наблюдается большого различия в амплитудах сигналов. Однако при $m > 3$ можно видеть ярко выраженные различия, которые достигают максимальных значений при $m > 8$ (примерно в 1,7 раза). Кривые 1 и 2 сходны по форме – начальный рост v_{max} , затем замедление этого возрастания. Начиная с некоторого m , изменение v_{max} прекращается, что свидетельствует о начале работы ПЭП в непрерывном режиме.

Отдельно стоит остановиться на вопросе, связанном с исследованием длительностей излучаемых зондирующих сигналов. Данные расчета позволяют утверждать, что при всех значениях параметра m при отсутствии корректирующей цепи

длительности акустических импульсов превышают 20 полупериодов колебаний. Данный факт свидетельствует в пользу того, что такие сигналы не могут

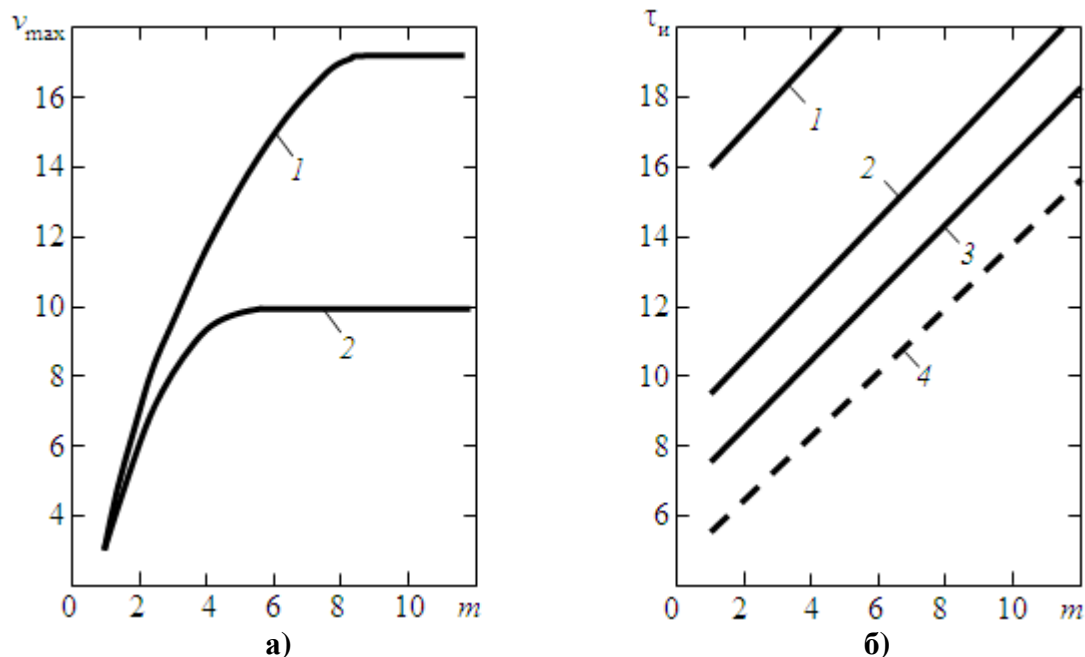


Рис. 3. Зависимости максимальных амплитуд (а) и длительностей (б) зондирующих сигналов колебательной скорости от числа полупериодов m в возбуждающем электрическом импульсе

использоваться для решения задач локационного характера, поскольку они являются слишком затянутыми. Использование индуктивно-резистивной нагрузки при $n_{\text{опт}} = 1,15$ и $Q_{\text{опт}} = 1,5$ позволяет существенно улучшить ситуацию, т. е. снизить τ_n для всех m из рассматриваемого диапазона. Иллюстрацией этого положения может служить рис. 3,б, отражающий зависимость $\tau_n(m)$. На этом рисунке кривая 4 соответствует варианту работы пластины с цепью при $n_{\text{опт}} = 1,15$ и $Q_{\text{опт}} = 1,5$. В рассмотренном в работе диапазоне изменения параметра m значения $\tau_n(m)$ заключены в интервале от 5,5 при $m = 1$ до 15,5 при $m = 12$.

Определенный интерес представляет сравнение результатов снижения длительностей сигналов, достигаемых за счет применения электрической цепи, с результатами, получаемыми при демпфировании пьезопластины. С этой целью на рис. 3,б приведены кривые 1–3, соответствующие различным степеням ее демпфирования (z_d – удельный акустический импеданс демпфера): 1 – $z_d = 3 \cdot 10^6$ Па·с/м; 2 – $z_d = 6 \cdot 10^6$ Па·с/м; 3 – $z_d = 9 \cdot 10^6$ Па·с/м. Эти кривые являются результатом исследования, проведенного в [4]. Из

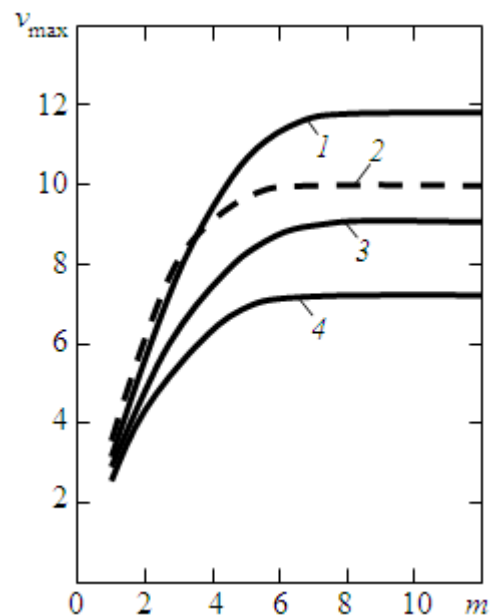


Рис. 4. Зависимости максимальных амплитуд зондирующих сигналов колебательной скорости от числа полупериодов m в возбуждающем электрическом импульсе

представленных данных можно сделать вывод о том, что даже при существенном демпфировании ($z_d = 9 \cdot 10^6$ Па·с/м, кривая 3), длительность зондирующих сигналов превышает длительность сигналов, излучаемых ПЭП при подключении к пластине корректирующей цепи с правильно определенными параметрами.

Зависимости максимальных амплитуд импульсов колебательной скорости в зондирующем импульсе v_{\max} от числа полупериодов, содержащихся в возбуждающем электрическом сигнале, показаны на рис. 4. Здесь представлены результаты для случаев применения демпфирования пластины и использования корректирующей цепи с правильно определенными параметрами ($n_{\text{опт}} = 1,15$ и $Q_{\text{опт}} = 1,5$). На рисунке приняты обозначения: 1 – $z_d = 3 \cdot 10^6$ Па·с/м; 2 – пьезопластина с нагрузкой с оптимальными значениями параметров; 3 – $z_d = 6 \cdot 10^6$ Па·с/м; 4 – $z_d = 9 \cdot 10^6$ Па·с/м. Все кривые имеют сходный характер. При $m > 5$ кривая, соответствующая случаю применения цепи (кривая 2), занимает промежуточное положение между кривой 1 ($z_d = 3 \cdot 10^6$ Па·с/м) и кривой 3 ($z_d = 6 \cdot 10^6$ Па·с/м).

Таким образом, полученные результаты позволяют судить об эффективности применения корректирующих электрических цепей для снижения длительностей зондирующих сигналов, излучаемых пластинчатыми преобразователями в водную среду.

Заключение

На основании расчетно-теоретических исследований показана возможность эффективного применения корректирующих электрических цепей с целью управления параметрами зондирующего сигнала ПЭП для подводных исследований. Определены конкретные значения параметров, характеризующих излучаемую систему, позволяющих добиваться минимальной длительности акустических импульсов при различной длительности возбуждающих ПЭП сигналов. Осуществлено сравнение длительностей и амплитуд излучаемых акустических сигналов при использовании механического демпфирования активного элемента и применения электрических корректирующих индуктивно-резистивных цепей. Отмечена целесообразность применения в ряде случаев RL -цепей. Представленные результаты могут быть использованы при проектировании системы управления выходным сигналом ПЭП для подводных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №22-22-20014).

Литература

1. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974. – 256 с.
2. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
3. 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, P.1456–1460.
4. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Влияние характера электрического возбуждения на параметры переходных процессов пьезоэлектрических преобразователей с пластинчатыми пьезоэлементами// Дефектоскопия, 2010, №8, С.28–35.