



УДК 681.883.67.001.24

С. И. Коновалов, А. Г. Кузьменко
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Об определении дистанции до объекта при рациональном выборе формы зондирующего акустического сигнала

Исследовано влияние формы акустического импульса, излучаемого пьезокерамическим преобразователем, на точность определения дистанции до объекта. Установлена целесообразность применения акустических импульсов длительностью три и пять полупериодов на резонансной частоте излучателя. Приведены формы соответствующих импульсов возбуждающего электрического напряжения. Осуществлены оценки погрешности измерения дистанции до объекта.

Пьезопластина, принцип Даламбера, компенсация, пьезоэлектрический преобразователь, акустический импульс, электрический импульс, дистанция, погрешность измерения

В теории радио- и гидролокации для определения дистанции до изучаемого объекта используется электромагнитный или акустический импульсный сигнал, который имеет вид высокочастотных колебаний. Его огибающей является видеоимпульс, модулирующий колебания высокой частоты, определяя тем самым форму зондирующего сигнала. В зависимости от решаемой задачи возможно применение различных форм излучаемых импульсов (прямоугольная, гауссова, экспоненциальная и т. д.). На экране индикатора наблюдают огибающую радиоимпульса. В процессе измерений определяется время между моментом излучения и появлением на развертке индикатора отметки от изучаемого объекта. Длительность импульса на экране конечна, однако привязки к отдельным моментам импульса (к моменту отсчета) не существует. В связи с этим приближенно считают, что погрешность измерения времени прихода (оно необходимо для расчета расстояния) определяется половиной длительности импульса. Очевидно, что этот метод нельзя отнести к прецизионным, но погрешность его во многих случаях считается удовлетворительной. Особенно это относится к случаю, при котором измеряемое расстояние существенно превышает

пространственную длину импульса. При этом необходимо отметить, что точность измерения может быть повышена за счет сокращения длительности импульса. Однако это возможно, если число колебаний несущей частоты остается достаточно большим (в противном случае требуется повышение несущей частоты), т. е. пока сохраняется принятая модель импульса. Значительное же снижение числа высокочастотных колебаний может повлечь за собой утрату понятия огибающей, столь удобного для работы. Рассмотрение короткого импульса, состоящего из нескольких колебаний, требует учета его дискретной структуры. Для электроакустического преобразователя в виде пьезопластины (пьезостержня) стремление получить короткий импульс при возможно более высокой чувствительности, приводит к необходимости возбуждать его одним полупериодом синусоидального электрического напряжения на собственной частоте преобразователя. Возникающий при этом переходный процесс может иметь длительность (при одностороннем излучении в водную среду и свободной тыльной стороне), превышающую двадцать полупериодов. Амплитуды переходного процесса в каждый из полупериодов могут быть вычислены методом Даламбера [1]–[4].

Кроме того, можно показать, что переходный процесс прекращается, если в любой из полупериодов после начального полупериода подать компенсирующий электрический импульс определенной амплитуды в противофазе с переходным процессом в данный полупериод. Компенсация (прекращение переходного процесса) произойдет в следующий полупериод. Расчет амплитуды компенсирующего импульса может быть выполнен в соответствии с методикой, подробно изложенной в работах [5], [6].

Остановимся более подробно на некоторых особенностях коротких импульсов, которые могут способствовать лучшему измерению расстояния. В случае, при котором импульс содержит несколько полупериодов, целесообразно стремиться к тому, чтобы в его середине была максимальная амплитуда. Это возможно, когда число полупериодов в импульсе нечетное. Максимальную амплитуду в середине импульса легче идентифицировать. Если использовать ее для отсчета, погрешности с разными знаками будут симметричны. При четном же числе полупериодов середина импульса приходится на переход через ноль, что не-

сколько осложняет процесс измерений. Кроме того, желательно отсутствие соседних максимумов (слева и справа) той же полярности непосредственно около выбранной амплитуды, соизмеримых с ней. Помимо этого, соотношение максимальной амплитуды и амплитуды первого полупериода желательно иметь возможно большим.

Рассмотрим несколько примеров с точки зрения выполнения описанных критериев. В качестве электроакустического преобразователя возьмем пьезокерамическую пластину (ЦТСНВ-1). Будем полагать, что с одной стороны она нагружена на воду, а с противоположной – свободна. Пусть возбуждающий сигнал представляет собой импульс электрического напряжения в виде одного полупериода синусоиды на собственной частоте преобразователя. Амплитуду напряжения возбуждения примем за единицу. Примем также следующие значения удельных акустических импедансов: пьезокерамика – $30 \cdot 10^6$ Па · с/м, вода – $1.5 \cdot 10^6$ Па · с/м.

На рис. 1, а приведена форма импульсов электрического напряжения. В первый полупериод подается возбуждающий импульс с условной ам-

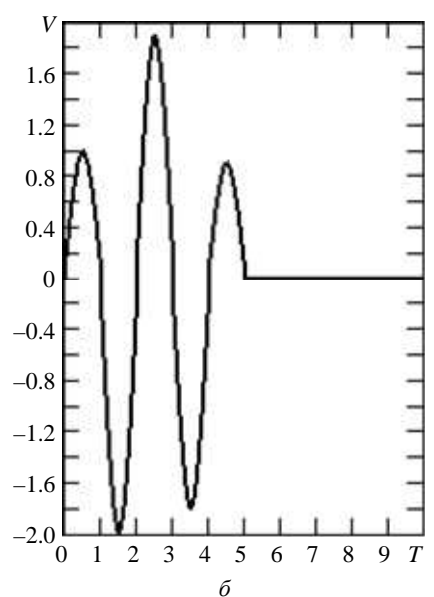
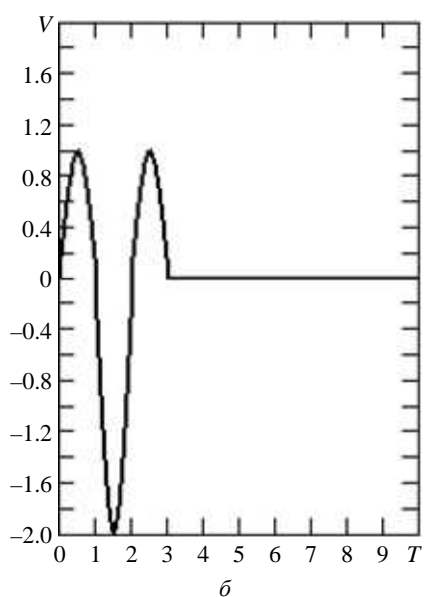
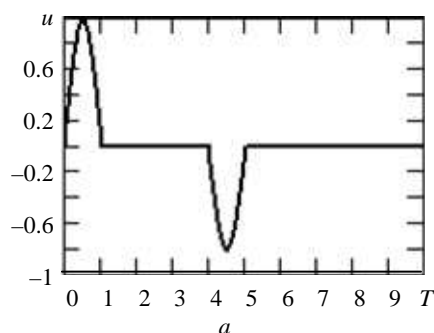
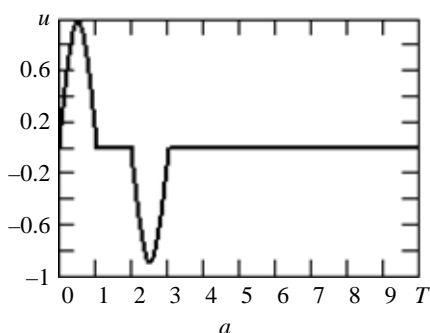


Рис. 1

Рис. 2

плитудой 1, а в третий полупериод – компенсирующий импульс с амплитудой $u_k = -0.905$. На рис. 1, б приведена форма излучаемого акустического импульса колебательной скорости. Все амплитуды нормированы к амплитуде первого полупериода. По поводу этого импульса можно сделать следующие замечания. Полная длительность импульса составляет 3 полупериода. Далее происходит полная компенсация, и колебательная скорость оказывается равна нулю. Импульс симметричен относительно середины второго полупериода. Амплитуды первого и третьего полупериодов равны единице и имеют одинаковую полярность. Амплитуда второго полупериода максимальна ($V_2 = -2$) и имеет противоположную полярность по сравнению с другими полупериодами. Отмеченные особенности позволяют легко идентифицировать эту амплитуду и использовать ее для отсчета. Оценим точность (погрешность) определения расстояния при использовании данного акустического импульса. Так как один полупериод соответствует половине длины волны ($\lambda/2$) в воде, а половина длительности импульса составляет $3/2$ полупериода, то получаем, что погрешность измерения не превышает $\Delta r = \pm \frac{3}{2} \frac{\lambda}{2} = \pm \frac{3}{4} \lambda$. Например, для частоты $f = 1$ МГц $\Delta r = \pm 1.125$ мм. Для более высокой частоты $f = 2.5$ МГц $\Delta r = \pm 0.45$ мм.

Рассмотрим теперь случай, который изображен на рис. 2. На рис. 2, а представлена форма импульсов электрического напряжения. В первый полупериод подается возбуждающий импульс, а в пятый полупериод – компенсирующий импульс, амплитуда которого равна -0.819 . Соответствующий акустический импульс колебательной скорости показан на рис. 2, б. Видно, что длительность импульса составляет пять полупериодов. В качестве точки отсчета может быть использован максимум амплитуды $V_{\max} = 1.905$ в центре импульса (2.5 полупериода). Однополярные максимумы ($V_1 = 1.0$; $V_5 = 0.905$) отстоят от центра на два полупериода каждый и имеют значения, приблизительно в 2 раза меньшие, чем V_{\max} . Все это позволяет легко идентифицировать центральную амплитуду. С противоположным знаком (минус) имеется только два полупериода, что позволяет исключить их из рассмотрения несмотря на амплитуды ($V_2 = -2$ и $V_4 = -1.81$), которые по своим значениям мало отличаются от центральной амплитуды. Погрешность измерения здесь не пре-

высит $\Delta r = \pm 5/4 \lambda$, что для частоты $f = 1$ МГц составит ± 1.875 мм, а для частоты $f = 2.5$ МГц – ± 0.75 мм.

При увеличении длительности акустических импульсов до семи и более полупериодов амплитуда в середине импульса не только не является максимальной из всех амплитуд, но и не сильно отличается от соседних с ней амплитуд, что может затруднить ее идентификацию. Поэтому при наличии одного возбуждающего полупериода электрического импульса и компенсирующего импульса, определяющего момент окончания акустического импульса и, следовательно, его длительность, наиболее благоприятны для определения расстояния (с точки зрения минимума ошибки и удобства применения) рассмотренные случаи, где длительность акустического импульса составляет три или пять полупериодов.

Представляют также интерес некоторые случаи, когда электрическое возбуждение состоит не из одного, а из двух полупериодов синусоидального напряжения на резонансной частоте преобразователя. Первый импульс подается в начальный полупериод, и его амплитуду принимаем за единицу. Второй импульс подается в следующий полупериод и его амплитуда равна -2 . Импульс компенсации подается, как и ранее, исходя из требований к длительности акустического импульса. На рис. 3, а представлена форма импульсов электрического напряжения. Возбуждающими являются два первых полупериода с амплитудами 1.0 и -2.0 соответственно. В третий полупериод подается компенсирующий импульс, имеющий амплитуду $u_k = -2.81$. На рис. 3, б представлен соответствующий акустический импульс колебательной скорости, нормированный к амплитуде первого полупериода. Длительность акустического импульса составляет три полупериода. Максимальное значение амплитуды соответствует середине импульса и равно -4 . Следующее (положительное) значение составляет 3.095. Амплитуду в середине импульса легко идентифицировать как по значению, так и по отсутствию слева и справа от нее импульсов той же полярности. Эта амплитуда превышает амплитуду первого полупериода в четыре раза, тогда как при возбуждении одним полупериодом данное соотношение равнялось двум. Отмеченное обстоятельство может способствовать более точной фиксации положения точки отсчета.

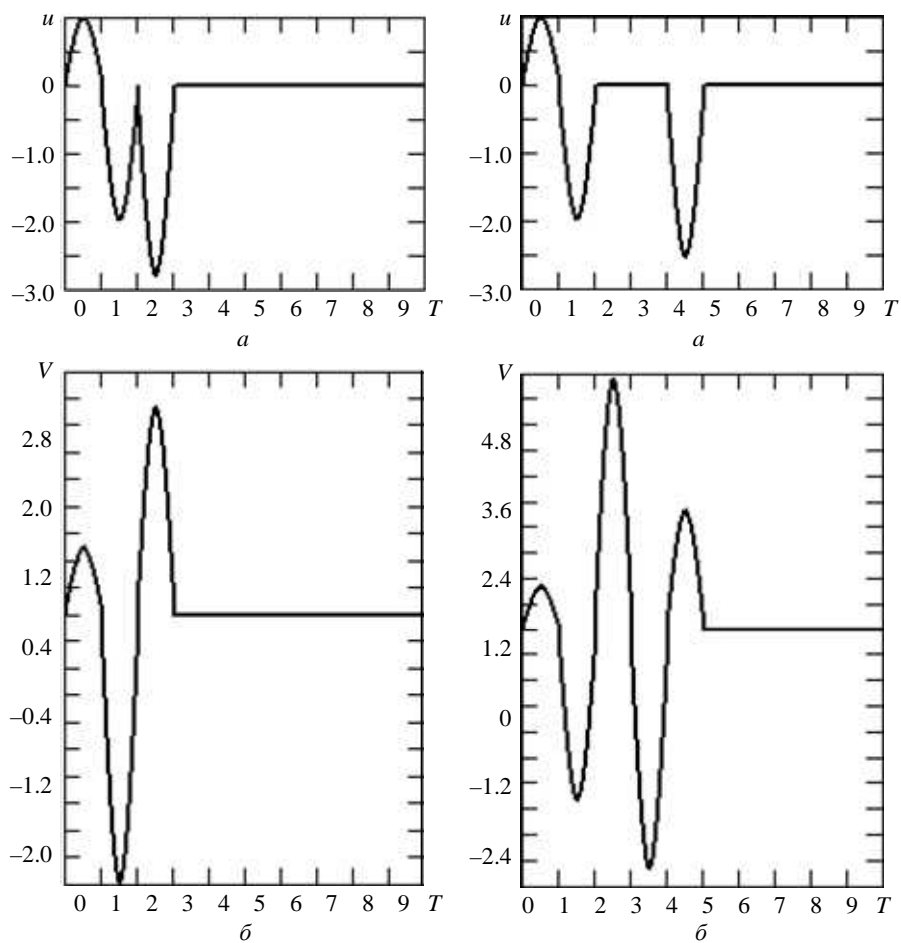


Рис. 3

Рис. 4

Перейдем теперь к рассмотрению случая, при котором, как и в предыдущем варианте, имеются два возбуждающих полупериода электрического напряжения, но компенсирующий импульс подается в пятом полупериоде. Форма электрического напряжения представлена на рис. 4, а. Амплитуды возбуждающих полупериодов и компенсирующего импульса равны, соответственно, 1, -2 и -2.54 . Акустический импульс колебательной скорости представлен на рис. 4, б. Длительность импульса составляет 5 полупериодов. Амплитуды полупериодов составляют, последовательно: 1; -4 ; 5.905; -5.619 ; 2.8. Амплитуда в середине импульса максимальна и равна 5.905. Амплитуды той же полярности слева и справа отстоят от нее на два полупериода и равны, соответственно, 1 и 2.8. Здесь наблюдается еще большее соотношение между центральной и первой амплитудами, чем в предыдущем случае. Идентифицировать центральную амплитуду можно по наличию еще двух амплитуд той же полярности. Что касается оцен-

ки погрешности при измерении расстояния, то она будет такой же, как и при возбуждении одним импульсом. Преимущество можно ожидать в более точном определении положения центральной амплитуды за счет ее значения, по сравнению с первым полупериодом.

Таким образом, с помощью метода Даламбера в работе исследовано влияние формы акустического сигнала, излучаемого в водную среду пьезокерамической пластиной, на точность определения дистанции до интересующего объекта. Показана возможность получения коротких акустических импульсов при возбуждении излучателя электрическими сигналами сложной формы. Дано теоретическое обоснование того, что при измерении расстояния до объекта целесообразно использовать акустические импульсы длительностью три и пять полупериодов на резонансной частоте преобразователя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-00693).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев А. С. Преобразователи ультразвуковых дефектоскопов: учеб. пособие / ЛЭТИ. Л., 1996. 80 с.
2. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1975. 258 с.
3. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. К вопросу о возможности сокращения длительности акустического импульса преобразователя, возбуждаемого импульсами специальной формы // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 1. С. 74–81.
4. Persson H. Electric excitation of ultrasound transducers for short pulse generation // *Ultrasound in medicine & biology*. 1981. Vol. 7, № 3. P. 285–291.
5. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014. 294 с.
6. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Об уменьшении длительности переходного процесса в электроакустическом пластинчатом пьезопреобразователе при использовании компенсирующего электрического импульса // Сб. науч. тр. XXVII сессии Российского акустического общества. СПб., 16–18 апр. 2014. СПб., 2014. С. 729–741.

S. I. Konovalov, A. G. Kuz'menko
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

ABOUT DETERMINATION OF A DISTANCE UP TO THE OBJECT AT THE RATIONAL CHOICE OF THE FORM OF THE ACOUSTIC SIGNAL

Effect of the form of the acoustic pulse radiated by the piezoceramic transducer, on precision of determination of a distance up to the object is probed. The expediency of application of acoustic pulses by duration three and five half-cycles on a resonant frequency of a transducer is established. Forms of the relevant pulses of exciting electric voltage are given. Estimations of a measuring error of a distance up to the object are realized.

Piezoceramic plate, principle d'Alembert, compensation, piezoelectric transducer, acoustic pulse, electric pulse, distance, error of measurement