УДК 681.883.67.001.24

С. И. Коновалов, А. Г. Кузьменко

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ СОКРАЩЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, ВОЗБУЖДАЕМОГО ИМПУЛЬСАМИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ

Рассмотрен импульсный режим работы пьезопреобразователя в виде пластины, которая с одной стороны нагружена на водную среду, а с другой – на воздух. В качестве инструмента исследования выбран метод Даламбера. На основании численно-теоретических исследований определены формы излучаемых в воду акустических импульсов при возбуждении пластины электрическими импульсами специально подобранной формы. Показана возможность получения коротких акустических сигналов при возбуждении преобразователя специально подобранными импульсами электрического возбуждения.

Пьезопреобразователь, принцип Даламбера, компенсация, акустический импульс, электрический импульс

Разработке и созданию ультразвуковой аппаратуры, предназначенной для решения задач локационного характера, уделяется самое серьезное внимание в нашей стране и за рубежом. Это связано с необходимостью решения разнообразных задач, возникающих в гидроакустике, дефектоскопии и медико-биологических исследованиях. Основное внимание при этом уделяется изучению возможности излучения и приема коротких сигналов, содержащих лишь несколько периодов высокочастотного заполнения, так как их применение позволяет улучшать разрешающую способность аппаратуры, снижать протяженность мертвой зоны и повышать точность определения координат объектов. Исследование переходных процессов, возникающих при возбуждении пьезопреобразователей короткими электрическими импульсами, может осуществляться различными путями, среди которых необходимо отметить метод Даламбера и использование специализированных математических пакетов, позволяющих моделировать работу тракта [1]–[3]. Кроме того, при анализе нестационарных режимов работы пьезопреобразователей в качестве математического инструмента исследования довольно часто используются 2 метода – спектральный, основанный на преобразованиях Фурье, и операторный, подразумевающий применение преобразований Лапласа. Несмотря на высокую эффективность упомянутых методов, им присущ недостаток, состоящий в их формальности и отсутствии наглядности, т. е. в недоста-

точности раскрытия физики явлений, происходящих в преобразователе. Указанный недостаток отсутствует в методе Даламбера, применение которого особенно удобно для рассмотрения переходных процессов в преобразователях простой формы, например пластинчатых и стержневых [1]. В соответствии с этим принципом колебания граней пьезопластины можно рассматривать независимо друг от друга. Результирующий сигнал при этом получается сложением компонентов, излученных каждой гранью в отдельности. К сожалению, в литературе достаточно слабо отражены вопросы, связанные с возможностью получения акустических импульсов произвольной длительности, возникающих при возбуждении преобразователя электрическими сигналами специальной формы.

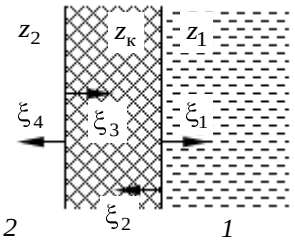

Рис. 1

Данная статья содержит некоторые результаты исследований авторов, полученные на основе метода Даламбера, позволяющие проследить динамику изменения формы акустического сигнала при изменении формы возбуждающего импульса. Постановку задачи иллюстрирует рис. 1. Пьезопластина (активный материал ЦТСНВ-1) в общем случае имеет акустическую нагрузку на среды *1* и *2*, удельные акустические сопротивления которых z_1 и z_2 соответственно. Удельное акустическое сопротивление пьезокерамики обозначим через $z_к$. Прямым пьезоэффектом пренебрежем. На правой грани пьезопластины при подаче электрического напряжения возникнут волны смещения $\xi_1 = \xi_{m1} e^{-jk_1 x}$ и $\xi_2 = \xi_{m2} e^{jk_к x}$, где k_1 и $k_к$ – волновые числа в среде *1* и пьезокерамике соответственно; ξ_{m1} и ξ_{m2} – амплитудные значения смещений. Ось x считаем направленной по толщине пластины. Напряженность электрического поля $E = U/d$, где U – возбуждающее электрическое напряжение, d – толщина пластины. На границе со средой *1* сохраняется непрерывность смещений и упругих напряжений. Отсюда получаем, что $\xi_{m1} = \xi_{m2}$. Для упругих напряжений имеем: $\sigma_к = c_{33}^D \frac{\partial \xi_2}{\partial x} - e_{33} E = j\omega z_к \xi_{m2} - e_{33} \frac{U}{d}$; $\sigma_1 = \rho_1 c_1^2 \frac{\partial \xi_1}{\partial x} = -j\omega z_1 \xi_{m1}$. Здесь c_{33}^D – упругий модуль пьезокерамики при постоянной индукции; e_{33} – пьезоконстанта; ρ_1 и c_1 – плотность среды *1* и скорость звука в ней. Из условий $\xi_{m1} = \xi_{m2}$ и $\sigma_к = \sigma_1$ находим $\xi_{m1} = AD_1$, где $A = \frac{e_{33} U}{2 j\omega d z_к}$, $D_1 = \frac{2 z_к}{z_1 + z_к}$ – коэффициент прохождения по смещению из пьезокерамики в среду *1*.

Точно так же для левой грани получим $\xi_{m3} = -AD_2$, где $D_2 = \frac{2 z_к}{z_к + z_2}$. Волны, распространяющиеся от правой грани к левой, будут отражаться от нее с коэффициентом отражения $R_2 = (z_к - z_2) / (z_к + z_2)$, а волны, распространяющиеся от левой грани к правой, будут отражаться от нее с коэффициентом отражения $R_1 = (z_к - z_1) / (z_к + z_1)$.

Номера полупериодов переходного процесса пронумеруем: $i = 0, 1, 2, \ldots$. Опустим общий для всех амплитуд множитель A. Тогда амплитуды акустического импульса в каждый из полупериодов будут иметь вид: $a_0 = D_1$; $a_i = D_1^2 R_2 (R_1 R_2)^{i/2 - 1}$ – для четных

$i \neq 0$, $a_i = -D_1 R_2 \ R_1 R_2 \ ^{i-1}/2$ – для нечетных i. Здесь предполагаем, что основной возбуждающий электрический импульс – полуволна синусоиды на антирезонансной частоте пластины при $i = 0$, а компенсирующий импульс – также полуволна синусоиды при $i \neq 0$. Введем параметр n – максимальный номер полупериода до начала компенсации. Амплитуды компенсирующего процесса примут вид: $\xi_{к\ i} = \begin{cases} 0, i \le n, \\ u_{комп}\ a_{i-n-1},\ i > n. \end{cases}$

Здесь $u_{комп}$ – амплитуда компенсирующего электрического импульса ($u_{комп} = U_{комп}/U$, где $U_{комп}$ – электрическое напряжение компенсации). Знак $u_{комп}$ берется противоположным знаку исходного импульса в полупериод компенсации, а абсолютное значение подбирается так, чтобы в следующий полупериод суммарный процесс был равен нулю. Амплитуда результирующего процесса $\xi_{рез\ i} = a_i + \xi_{к\ i}$.

На основе представленных теоретических положений можно рассчитать форму излучаемых в исследуемую среду акустических импульсов. При этом для определенности будем считать, что в качестве среды *1* выбрана жидкость (вода), а в качестве среды *2* – воздух. На рис. 2 представлен сигнал, излучаемый рассматриваемым преобразователем при его возбуждении электрическим импульсом длительностью, равной одному полупериоду синусоиды на частоте антирезонанса пластины. По оси абсцисс отложено безразмерное время T, которое определяется как $T = t/\ T_0/2$, где t – физическое (истинное) время, T_0 – длительность периода колебаний на частоте антирезонанса пластины. Введение параметра T позволяет измерять длительность излучаемого импульса в виде числа полупериодов колебаний на собственной частоте пластины. По оси ординат отложены значения отношения ξ/ξ_1, которое представляет собой нормированные к амплитуде первого полупериода значения смещения (здесь ξ_1 является амплитудой первого полупериода излучаемого импульса). Из данных, приведенных на рис. 2, можно видеть, что излучаемый сигнал достигает максимума на втором полупериоде, после чего начинается медленный спад его амплитуды. Переходный процесс, вызванный возбуждающим импульсом, имеет очень большую длительность, подтверждением чего могут служить также и данные, представленные в табл. 1, где приведены значения амплитуд для каждого из полупериодов импульса, т. е. отношения ξ/ξ_1.

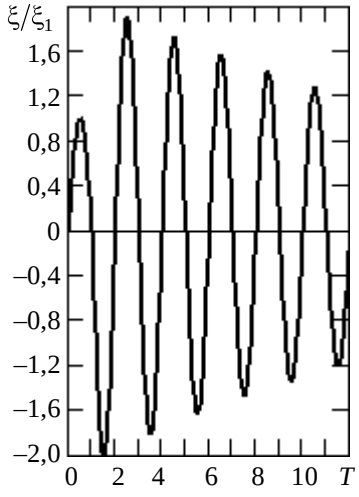

Рис. 2

Таблица 1

Номер полупериода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Значения ξ/ξ_1	1	–2	1,91	–1,81	1,72	–1,64	1,56	–1,48	1,41	–1,34	1,28	–1,21

Действительно, максимума амплитуды, т. е. $\xi/\xi_1 = -2$, сигнал достигает на втором полупериоде, а к 12-му полупериоду $\xi/\xi_1 = -1,21$, что соответствует спаду сигнала всего лишь до 60 % от максимального значения. Совершенно очевидно, что сигналы подобного вида не могут представлять интереса для решения задач локационного характера, поскольку основным требованием здесь является малая длительность излучаемого акустического импульса. Сократить длительность акустического сигнала можно подачей на электрический вход преобразователя специально подобранного возбуждающего электрического импульса, состоящего из двух полупериодов. Первый полупериод возбуждающего напряжения является электрическим импульсом с длительностью, равной одному полупериоду синусоиды на частоте антирезонанса пластины. Его воздействие на излучатель вызывает переходный процесс, аналогичный тому, который представлен на рис. 2. Другой же (компенсирующий) полупериод импульса возбуждения, поданный через определенное время после первого, заставляет пластину совершать колебания в противофазе по отношению к колебаниям, которые были вызваны первым полупериодом. В результате колебательный процесс прекращается, т. е. преобразователь излучает короткий акустический импульс. Изменяя время подачи компенсирующего полупериода, а также его амплитуду (с учетом знака), можно регулировать длительность излучаемого акустического сигнала. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Пусть электрическое возбуждение преобразователя осуществляется импульсом напряжения, который представляет собой 2 следующих друг за другом полупериода колебаний положительной полярности. При этом значение параметра n, используемого при получении расчетных выражений, составляет $n = 0$, что соответствует случаю, при котором компенсирующий полупериод электрического напряжения находится во временном диапазоне от $T = 1$ до $T = 2$. Указанный импульс представлен на рис. 3, *а*. По оси абсцисс отложено безразмерное время T, а по оси ординат – нормированное к амплитуде первого полупериода электрическое напряжение u/u_1. Амплитуды этих полупериодов составляют: $u/u_1 = 1$ для первого полупериода и $u/u_1 \approx 0,95$ для компенсирующего. На рис. 3, *б* показан вид излучаемого акустического сигнала при возбуждении преобразователя импульсом описанного вида. По оси абсцисс отложено безразмерное время T, по оси ординат – значения величины ξ/ξ_1, т. е. нормированные к амплитуде первого полупериода значения смещения (ξ_1 является амплитудой первого полупериода излучаемого акустического импульса).

Можно видеть, что акустический импульс составляет всего лишь 2 полупериода колебаний на собственной частоте пьезопластины. Значения амплитуд полупериодов акустического импульса во всем рассматриваемом диапазоне значений времени T сведены для удобства в табл. 2.

Таблица 2

Номер полупериода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Значения ξ/ξ_1	1	–1,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

На рис. 4 показан вид импульса электрического возбуждения (рис. 4, *а*) преобразователя и соответствующий ему излучаемый акустический импульс (рис. 4, *б*). Для данного электрического импульса $n=1$, т. е. компенсирующий полупериод колебаний располагается на оси времени от $T=2$ до $T=3$. Амплитуды полупериодов импульса возбуждения составляют: $u/u_1=1$ для первого полупериода и $u/u_1\approx -0{,}91$ для компенсирующего. В данном случае амплитуда компенсирующего полупериода является отрицательной. Излучаемый акустический импульс имеет длительность, равную трем полупериодам колебаний на собственной частоте пластины. В табл. 3 занесены значения амплитуд излучаемого пьезопреобразователем импульса.

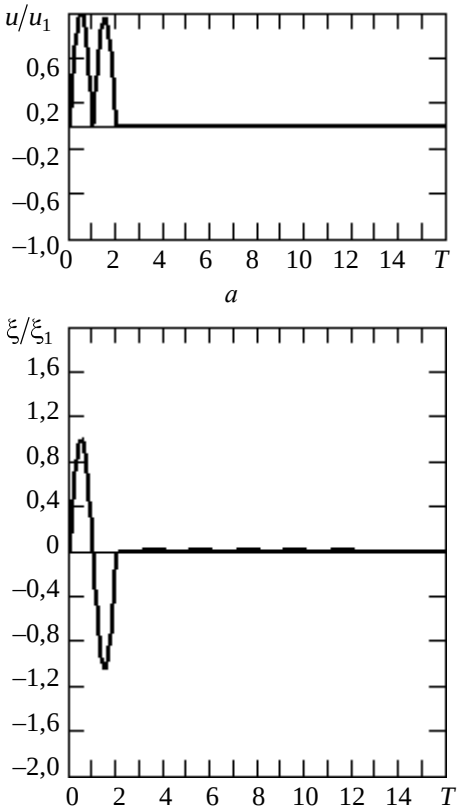

Рис. 3

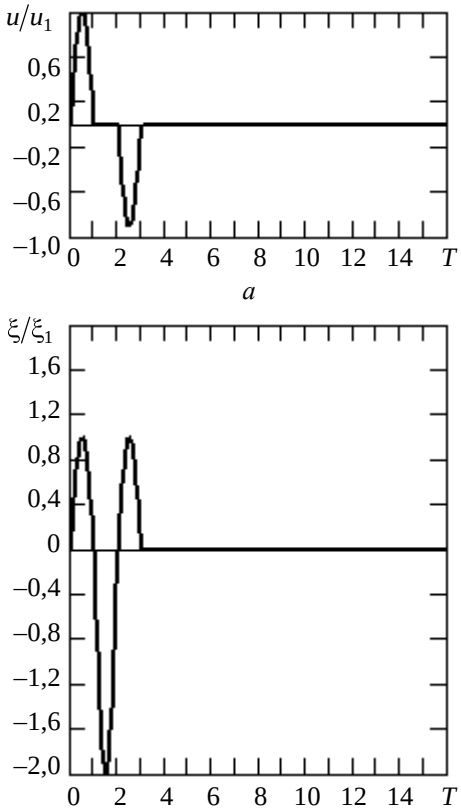

Рис. 4

Таблица 3

Номер полупериода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Значения ξ/ξ_1	1	–2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

На рис. 5 и 6 показано дальнейшее развитие тенденции изменения формы излучаемого акустического импульса при увеличении временного сдвига компенсирующего полупериода электрического напряжения относительно первого полупериода. Так, например (рис. 5, *а*), при $n=2$ (это соответствует расположению компенсирующей части электрического импульса в диапазоне от $T=3$ до $T=4$) длительность результирующего акустического импульса составляет 4 полупериода колебаний (рис. 5, *б*). При этом амплитуды полупериодов импульса

возбуждения составляют: $u/u_1 = 1$ для первого полупериода и $u/u_1 \approx 0{,}86$ для компенсирующего. Стоит обратить внимание на то, что амплитуда компенсирующего полупериода электрического воздействия является положительной. Значения амплитуд полупериодов акустического сигнала, который излучается преобразователем, представлены в табл. 4.

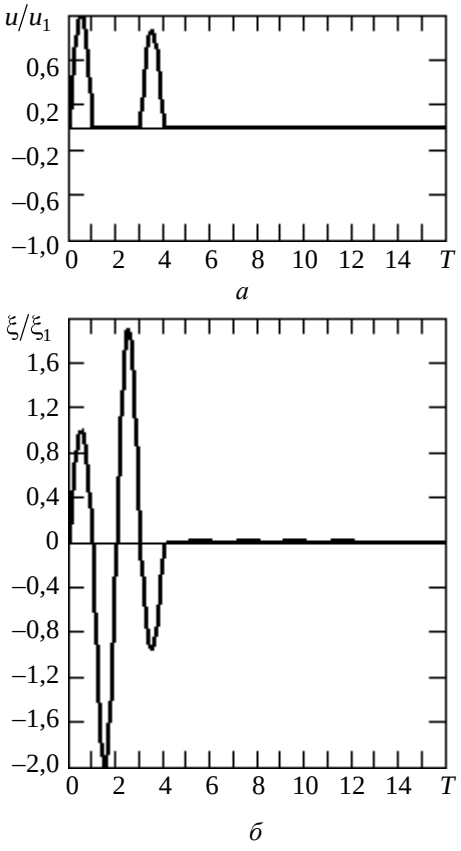

Рис. 5

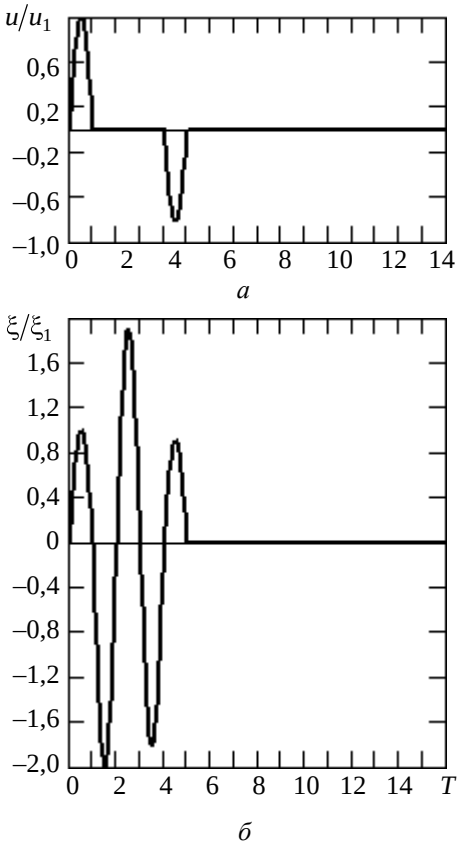

Рис. 6

Таблица 4

Номер полупериода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Значения ξ/ξ_1	1	–2	1,91	–0,95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Из рис. 6 видно, что с ростом значений параметра n до $n = 3$, т. е. при нахождении компенсирующего полупериода электрического импульса во временном диапазоне от $T = 4$ до $T = 5$ (рис. 6, *а*), длительность акустического импульса возрастает до пяти полупериодов. Амплитуда компенсирующего импульса имеет знак “минус”. Амплитуды полупериодов импульса возбуждения составляют: $u/u_1 = 1$ для первого полупериода и $u/u_1 \approx -0{,}82$ для компенсирующего. Значения амплитуд каждого из полупериодов акустического сигнала для данного случая представлены в табл. 5.

Таблица 5

Номер полупериода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Значения ξ/ξ_1	1	–2	1,91	–1,81	0,91	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Описанная тенденция изменения длительности акустического импульса в зависимости от временного сдвига между первым и компенсирующим полупериодами электрического сигнала, возбуждающего преобразователь, сохраняется и в дальнейшем. Для подтверждения этого положения можно обратиться к рис. 7 и 8. Данные, отображенные на рис. 7, соответствуют случаю, при котором $n=6$. Для рис. 8 $n=10$. При $n=6$ (рис. 7, *а*) компенсирующий полупериод электрического сигнала находится в интервале от $T=7$ до $T=8$, а при $n=10$ (рис. 8, *а*) этот интервал заключен от $T=11$ до $T=12$. В обоих случаях амплитуды компенсирующих полупериодов электрического сигнала положительны. Амплитуды полупериодов импульса возбуждения составляют: $u/u_1=1$ и $u/u_1\approx 0{,}705$ (для варианта, представленного на рис. 7, *а*); $u/u_1=1$ и $u/u_1\approx 0{,}58$ (для варианта, соответствующего рис. 8, *а*). В первом случае (рис. 7, *б*) длительность акустического импульса составляет 8 полупериодов. В табл. 6 для удобства внесены значения амплитуд каждого из полупериодов излучаемого акустического импульса.

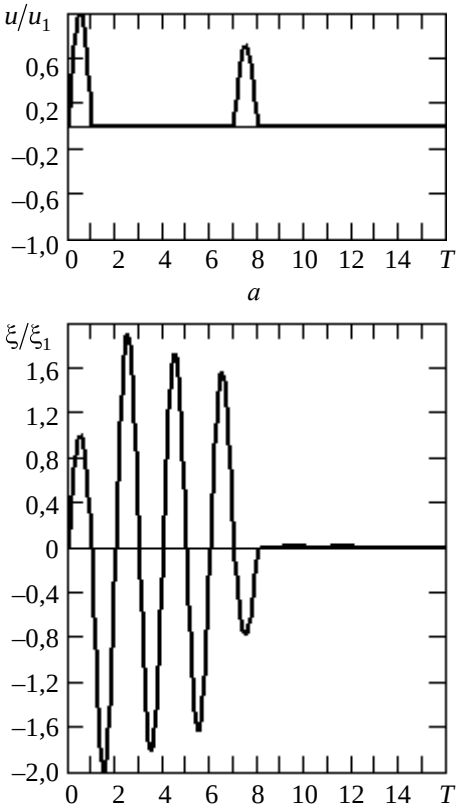

Рис. 7

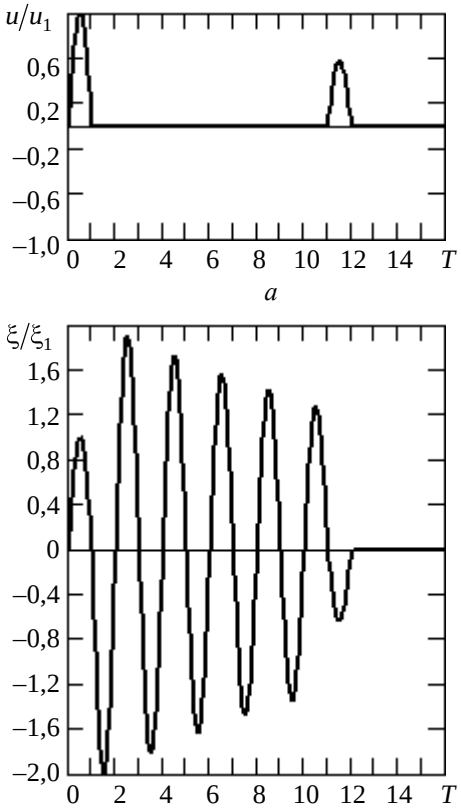

Рис. 8

Таблица 6

Номер полупериода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Значения ξ/ξ_1	1	–2	1,91	–1,81	1,72	–1,64	1,56	0,78	0	0	0	0	0	0

Во втором случае (рис. 8, *б*) длительность акустического импульса равняется 12 полупериодам колебаний на собственной частоте пластины. Значения амплитуд каждого из полупериодов акустического импульса для данного случая приведены в табл. 7.

Таблица 7

Номер полупериода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Значения ξ/ξ_1	1	–2	1,91	–1,81	1,72	–1,64	1,56	–1,48	1,41	–1,34	1,28	–0,64	0	0

Таким образом, в статье описан импульсный режим работы пьезопластины при односторонней ее нагрузке на воду. Исследование проведено с помощью метода Даламбера. Прослежена динамика изменения формы акустического сигнала при возбуждении преобразователя импульсами электрического напряжения специальной формы. Показана возможность получения необходимой длительности акустического сигнала при правильном подборе возбуждающего электрического импульса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (контракт № 13.G25.31.0054).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев А. С. Преобразователи ультразвуковых дефектоскопов:Учеб пособие / ЛЭТИ. Л., 1996.

2. Transducer resolution enhancement by combining different excitation pulses / J. Salazar, A. Turo, J. A. Chavez et al. // Ultrasonics. 2000. 38, № 1 – 8. P. 145 – 150.

3. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974.

S. I. Konovalov, A. G. Kuz'menko

TO THE QUESTION ON THE REDUCTION OF ACOUSTICAL PULSE DURATION OF THE TRANSDUCER EXCITED BY PULSES OF THE SPECIAL SHAPE

The pulse mode of operation of the piezoelectric transducer as a plate is considered. One side of the plate is loaded on the water medium, and another - on air. At carrying out of research method d'Alembert was used. On the basis of numerical-theoretical researches shapes of radiated acoustic pulses in water are defined at excitation of a plate by electric pulses of special shape. The opportunity of radiation of short acoustic signals is shown at excitation of the transducer by pulses of electric excitation of the special form

Piezoelectric transducer, principle d'Alembert, compensation, an acoustic pulse, an electric pulse

УДК 681.20; 547.47

Я. А. Бекенева, К. О. Комшилова, В. А. Комшилова

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИКИ

Рассмотрен вопрос оценки динамической погрешности средств измерений на базе ПЛК. Приведены аналитические выражения для оценки динамической погрешности средств измерений на базе ПЛК. Приведен сравнительный анализ динамических характеристик систем на базе ПЛК для протоколов Modbus, Profibus и DeviceNet.

ПЛК, динамические ошибки средств измерений, Modbus, Profibus, DeviceNet

В течение последнего десятилетия развитие многих отраслей промышленности привело к возникновению компактных и удобных в использовании систем мониторинга и управления технологическими процессами. Важную роль в таких системах часто играют и средства измерениях физических величин. От значения тех или иных величин подчас зависит выработка или отсутствие определенных управляющих сигналов, а также типы этих сигналов. Основные требования, предъявляемые к таким первичным измерительным