

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ВОДОЗАПОЛНЕННОГО ОСЦИЛЛИРУЮЩЕГО ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО КОЛЬЦА

В. Г. Басовский, И. В. Вовк

*Институт гидромеханики НАН Украины
ул. Желябова, 8/4, 03680, Киев-180, ГСП, Украина
тел. (044) 456-69-83; e-mail: basovsky@ukr.net, vovk@visti.com*

Рассмотрена задача об излучении звука осциллирующим пьезокерамическим кольцом при возбуждении его электрическим сигналом в форме периодической последовательности радиоимпульсов. Представлен численный анализ колебательной скорости и дальнего поля кольца в зависимости от параметров радиоимпульсов. Показано, что амплитуда колебательной скорости кольца может заметно превышать соответствующее значение амплитуды при работе кольца в непрерывном режиме. Установлен ряд закономерностей давления в дальнем поле кольца от времени и направления.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что в гидролокации чаще всего основным режимом работы является импульсный. Импульсные сигналы также применяются при акустических исследованиях в ограниченных объемах, чтобы исключить влияние отраженных сигналов. Здесь особо следует выделить задачи измерения и тестирования акустических характеристик преобразователей в ограниченных бассейнах или естественных водоемах. Вместе с этим, в акустической литературе традиционно значительно большее внимание уделяется анализу акустических характеристик преобразователей, когда они возбуждаются монохромным гармоническим сигналом. Такой режим работы преобразователей принято называть в акустике непрерывным. Поэтому представляет большой научный и практический интерес изучения акустических излучателей и приемников в импульсных режимах работы [1].

Целью настоящего доклада является исследование акустических свойств осциллирующего пьезокерамического кольца в импульсном режиме работы.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим пьезокерамическое кольцо поляризованное в радиальном направлении (рис. 1, а). Такое кольцо может совершать осциллирующие радиальные колебания в низкочастотном диапазоне, когда сплошные электроды на его боковых поверхностях электрически разделить вдоль образующей на две равные части и на них подать противофазное электрическое напряжение (рис. 1, б) [2].

В отличие от статьи [2] будем полагать, что электрическое напряжение $U_i(t)$ подается на электроды кольца в виде периодически повторяющихся радиоимпульсов:

$$U_i(t) = \begin{cases} U_0 \sin(\omega_r t), & lT_i \leq t \leq lT_i + \tau_i, \\ 0, & lT_i + \tau_i < t \leq (l+1)T_i. \end{cases} \quad (1)$$

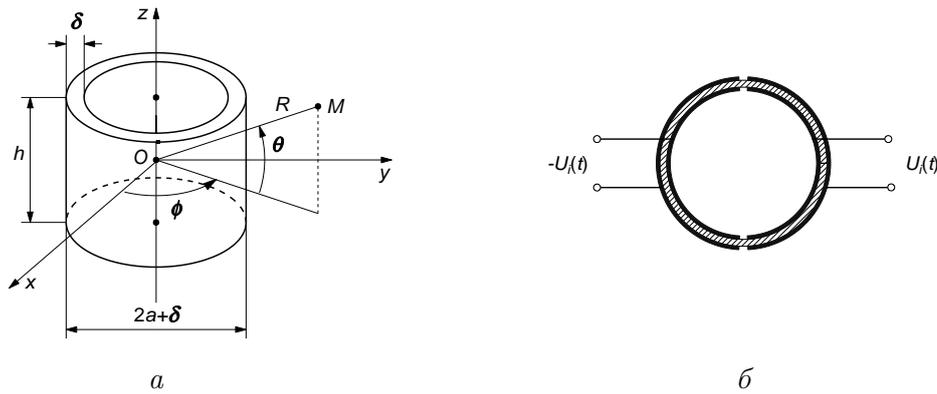


Рис. 1. Геометрия кольца (а) и схема подключения электродов для осциллирующего кольца (б)

Здесь U_0 – амплитуда несущей радиоимпульса; $\omega_r = 2\pi f_r = 2\pi/T_r$ – круговая частота несущей, где f_r и T_r соответственно частота и период несущей. T_i , τ_i – соответственно период повторения и длительность радиоимпульса; $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Пусть в радиоимпульсе содержится целое число периодов несущей, тогда функцию $U_i(t)$ можно разложить в ряд Фурье по тригонометрическим функциям:

$$U_i(t) = U_0 \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_i t) + b_n \sin(n\omega_i t)) = U_0 \mathbf{Re} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (a_n + jb_n) e^{-jn\omega_i t} \right\}, \quad (2)$$

где a_n , b_n – коэффициенты ряда Фурье; $\omega_i = 2\pi/T_i$; j – мнимая единица.

Пользуясь разложением (2), дальше задача решается следующим образом: выбираются последовательно электрические напряжения на электродах кольца в виде гармонических сигналов $U_n(t) = U_0(a_n + jb_n) \exp(-jn\omega_i t)$ ($n = 1, 2, \dots$) и решаются задачи излучения для непрерывного режима работы кольца [2]. После чего решение задачи для импульсного режима работы кольца можно получить как действительную часть ряда Фурье по соответствующим решениям задачи для непрерывного режима работы кольца.

2 АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ниже приведены численные результаты анализа осциллирующего кольца, изготовленного из пьезокерамики ЦТБС-3 и погруженного в безграничную жидкость с волновым сопротивлением $\rho c = 1.5 \cdot 10^6$ кг/(м²·с). Относительные геометрические размеры кольца следующие: $h/a = 0.65$ и $\delta/a = 0.093$. Механическая добротность кольца равна 30.

Пусть на электроды кольца (рис. 1, б) подается электрический импульс (1), имеющий следующие параметры: количество периодов несущей $N_i = \tau_i/T_r = 20$ и скважность $q_i = T_i/\tau_i = 3$. При решении задачи ряд Фурье (2) заменяли частной суммой $U_i^*(t)$ из конечного числа первых членов этого ряда. За меру уклонения такой частной суммы от функции $U_i(t)$ принимали относительное квадратичное уклонение [3]. Во всех приведенных ниже расчетах значение этой меры меньше 0.001. На рис. 2, а, б соответственно

изображены точная зависимость подаваемого импульса от времени (1) и ее аппроксимация частной суммой ряда Фурье (2) при удержании 100 членов ряда. Здесь и ниже зависимости показаны для отрезка времени равному одному периоду следования импульса. Как видно, зависимости на этих рисунках весьма близки, что является основанием корректного анализа акустических характеристик рассматриваемого кольца.

Перейдем к анализу конкретных численных результатов для относительных значений колебательной скорости кольца $\bar{V}(t) = V(t)/V_0$ и давления $\bar{p}(t^*) = p(t^*)/p_0$ в дальнем поле ($V_0 = NU_0/(\rho cS)$, $p_0 = (NU_0/S) \cdot (a/R)$, где N – коэффициент электромеханической трансформации, S – площадь боковой поверхности кольца; $t^* = t - R/c$). Ниже зависимости для $\bar{V}(t)$ и $\bar{p}(t^*)$ представлены только для значения азимутального угла $\varphi = 0$. Для других значений этого угла результат следует умножить на $\cos \varphi$ [2].

Обратимся к рис. 2, в, г, на которых соответственно изображены зависимости $\bar{V}(t)$ и $\bar{p}(t^*)$ при $\theta = 0$ для наиболее интересного с практической точки зрения случая, когда частота несущей совпадает с собственной частотой осциллирующего кольца в воде [2] (в данном случае $f_r/f_0 = 0.84$, где f_0 – собственная частота осциллирующего кольца в вакууме). На этих графиках видим типичные искажения исходного импульса. В начале происходит нарастание сигнала по экспоненте и установление непрерывного режима работы кольца. После окончания импульса возбуждения значения скорости и давления падают по экспоненте. Здесь и ниже штриховые линии обозначают амплитудные значения соответствующих величин в непрерывном режиме работы кольца на частоте несущей импульса.

Совершенно иную картину можно наблюдать на частотах ниже резонансной частоты кольца в воде (см. рис. 2, д, е). Из этих рисунков хорошо видно, что имеются заметные различия между формами импульсов колебательной скорости кольца и давления в дальнем поле при $\theta = 0$. Здесь амплитуда колебательной скорости кольца достигает значений амплитуды соответствующего непрерывного режима работы кольца и форма импульса мало отличается от формы исходного сигнала, за исключением малых отрезков времени в начале импульса, где наблюдаются переходные процессы в виде коротких всплесков. Эти всплески в некоторых случаях на практике могут приводить к механическому разрушению кольца. Что касается импульса давления, то он по сути состоит из двух явно выраженных переходных процессов, которые являются реакцией дальнего поля на начало и конец импульса возбуждения кольца. При этом амплитуды импульса давления могут значительно превышать значения амплитуды для соответствующего непрерывного режима работы кольца. Также следует отметить явление реверберации для импульса давления в межимпульсном интервале времени, что объясняется многократным переотражением излученной волны во внутреннем объеме кольца.

Выше был рассмотрен частный случай, когда длина импульса составляла 20 периодов несущей. Очевидно, что при увеличении длительности импульса отклик рассматриваемого кольца будет все ближе к непрерывному режиму его работы. Совершенно иная картина будет при уменьшении длительности импульса. В этом случае, как показывают численные эксперименты, акустические характеристики кольца не только не успевают достичь амплитудных значений непрерывного режима, но имеет место интенсивная реверберация в межимпульсном временном интервале. Это хорошо видно на рис. 3, на котором, как пример, изображены зависимости для колебательной скорости кольца и давления в дальнем поле для случая, когда $f_r/f_0 = 0.84$, $N_i = 5$, $q_i = 3$.

Выше импульс давления в дальнем поле рассмотрен только для углов $\theta = 0$.

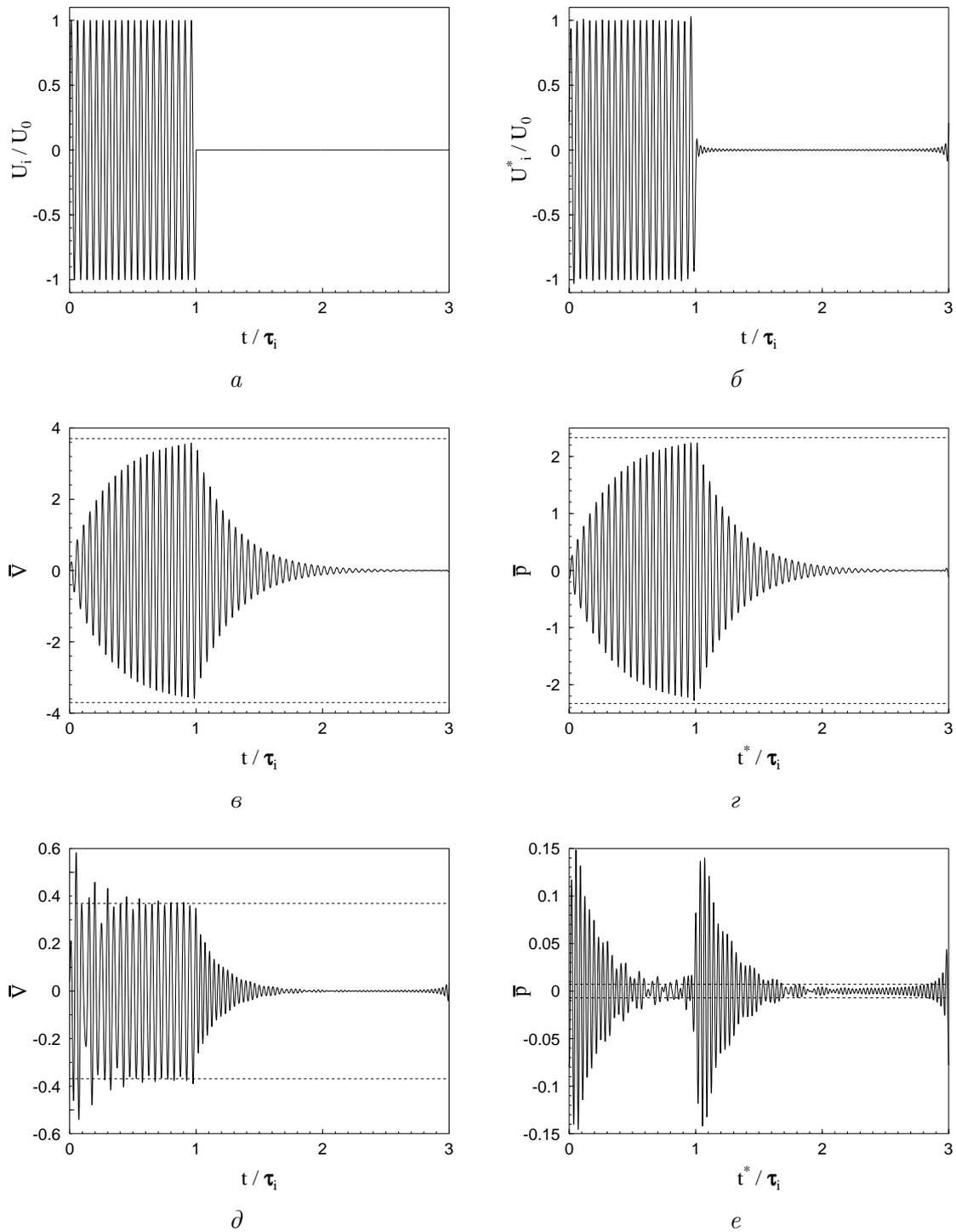


Рис. 2. Исходный сигнал и отклик осциллирующего кольца:

a – импульс, рассчитанный по формуле (1); *b* – импульс, рассчитанный с помощью частичной суммы ряда (2);
c, *d* – колебательная скорость кольца и давление в дальнем поле для $f_r/f_0 = 0.84$;
e – колебательная скорость кольца и давление в дальнем поле для $f_r/f_0 = 0.6$;

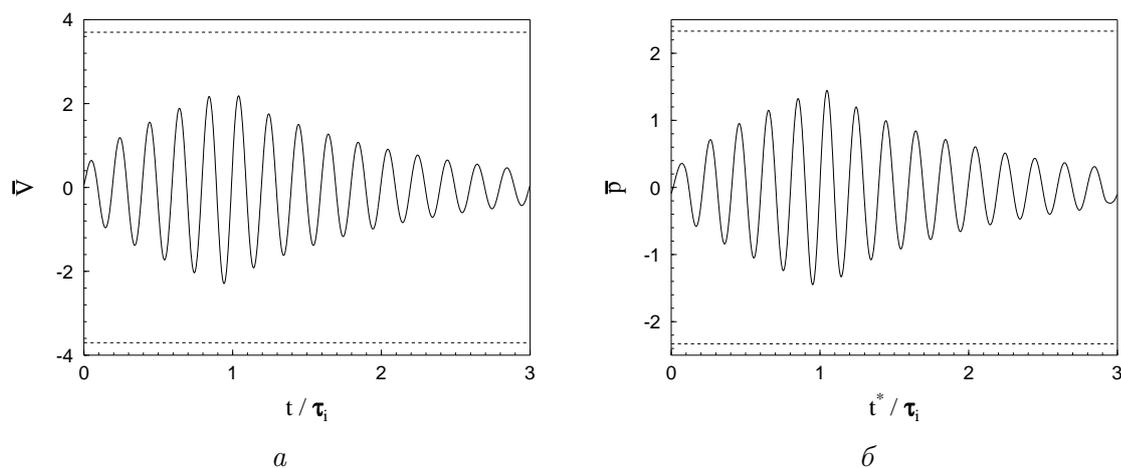


Рис. 3. Отклик осциллирующего кольца ($f_r/f_0=0.84$, $N_i=5$, $q_i=3$):
 а – импульс колебательной скорости кольца; б – импульс давления в дальнем поле кольца

Для других направлений, как показали расчеты, импульс давления, как правило, сохраняет свою форму, исключая зону углов θ , где диаграмма направленности кольца в непрерывном режиме обращается в нуль [2]. Оценить диаграмму направленности кольца в импульсном режиме, по возможности близко к диаграмме в непрерывном режиме работы, можно, например, пользуясь предложенным в статье [1] алгоритмом.

ВЫВОДЫ

Решена задача об излучении звука водозаполненным осциллирующим пьезокерамическим кольцом при возбуждении его электрическим сигналом в виде периодической последовательности радиоимпульсов. На основе полученного решения проведен численный анализ колебательной скорости кольца и давления в дальнем поле в зависимости от времени и параметров радиоимпульса. Показано, что амплитуда колебательной скорости кольца может заметно превышать соответствующее значение амплитуды в его непрерывном режиме работы. Установлено, что форма импульса давления в дальнем поле существенно изменяется в зоне углов, где диаграмма направленности кольца в непрерывном режиме обращается в нуль.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вовк И. В., Мацыпура В. Т. Излучение звука решеткой, образованной соосными цилиндрическими пьезокерамическими оболочками с торцевыми экранами. Часть IV. Импульсный режим работы // Акуст. вісн.– 2002.– 5, N 2.– С. 13–26.
2. Басовский В. Г. Излучение звука конечной решеткой из открытых пьезокерамических колец // Акуст. вісн.– 1998.– 1, N 2.– С. 3–20.
3. Толстов Г. П. Ряды Фурье.– М.: Наука, 1980.– 384 с.