

УДК 534.134

С.А. Найда, д-р техн. наук

Возбуждение коротких ультразвуковых импульсов недемпфированным пьезоэлектрическим преобразователем

Проведен сравнительный анализ влияния различных форм и параметров возбуждающих импульсов на форму ультразвуковых импульсов. Предложены практические рекомендации относительно выбора формы возбуждающих электрических импульсов для получения коротких ультразвуковых импульсов с помощью недемпфированного пьезоэлектрического преобразователя.

The comparative analysis of impact of various forms and parameters of the excitation pulses on the form of ultrasonic pulses is carried out. Practical recommendations regarding the selection of a form of exciting electric pulses to get short ultrasonic pulses with the help of undamped piezoelectric transducer are proposed.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, ультразвуковой импульс, переходная характеристика, передаточная функция.

Введение

С ультразвуковой эхоскопией человек встречается еще в утробе матери при ультразвуковом обследовании беременных женщин. Призыв Всемирной организации здравоохранения пересмотреть существующую политику их обычного ультразвукового обследования послужил дополнительным толчком к дальнейшему совершенствованию эхоскопов. Новой вехой в этом направлении стало появление широкополосных диагностических эхоскопов [1,2]. В отличие от традиционных одночастотных эхоскопов, в которых рабочий диапазон перекрывается с помощью набора сменных узкополосных пьезоэлектрических преобразователей (называемых также преобразователями, головками, датчиками), в них используются широкополосные преобразователи.

Задача анализа режима работы преобразователя в широкой полосе частот, как правило, сводится к поиску некоторых оптимальных соотношений между параметрами согласующих элементов, которые обеспечивают предельные значения полосы пропускания. Подобного рода задачи относятся к классу задач многопараметрической оптимизации, если считать функцией качества системы ее полосу пропускания.

Полоса пропускания, как функция параметров согласующих акустических и электрических элементов, является многоэкстремальной, поэтому сама задача анализа широкополосных систем сводится к отысканию глобального максимума функции качества. Эта задача рассматривалась в работах [3, 4] применительно к пьезоизлучателям. Для обеспечения расчетов была разработана библиотека программ, включающая в себя: подпрограмму расчета коэффициента передачи по мощности; подпрограмму расчета полосы пропускания и программу, реализующую алгоритм наискорейшего спуска, называемый обычно методом Гаусса (Гаусса-Зейделя) [5] и статистический метод моделирования параметров [5-8]. При этом численные расчеты даже простых систем оказались очень громоздкими. Были получены оптимальные АЧХ коэффициента преобразования мощности для частного случая преобразователя с заданным волновым сопротивлением Z_0 и разными значениями коэффициента электромеханической связи k_t . Воспользоваться этими результатами для реальных преобразователей с другими Z_0 и k_t не представляется возможным.

Следует заметить, что амплитудно - частотная характеристика (АЧХ) коэффициента передачи характеризуется не только полосой пропускания, но и величиной пульсации его в этой полосе. Неравномерность частотной характеристики учитывается в теории фильтров с частотно независимыми параметрами [6]. Как она учтена при расчете полосы в [3, 4], не указывается. Ясно, что функция качества в случае преобразователя со слоями, должна выражаться сложным образом. Кроме того, нахождение экстремума в задачах оптимизации [5-8] сводится к итерационному процессу, что требует громоздких расчетов.

Анализ применяемых в ультразвуковой дефектоскопии широкополосных разнотолщинных преобразователей, а также преобразователей с демпфированием показал [1], что для медицинских эхоскопов они не пригодны. Подходящими оказались два метода существенного расширения полосы пластинчатых преобразователей. Первый – с помощью акустических слоев и электрических звеньев простейшего типа. По-

следнее важно для преобразователей с линейным сканированием, в которых число элементов достигает сотни, и для выравнивания их характеристик в одночастотных преобразователях используют элементы подстройки (обычно включенные параллельно преобразователю индуктивности). Второй – путем возбуждения преобразователя ступенчатыми и трапецеидальными импульсами.

Целью данной работы и является исследование методов возбуждения коротких ультразвуковых импульсов недемпфированным пьезопреобразователем при подаче на него ступенчатых и трапецеидальных электрических импульсов.

1. Переходные характеристики линейных цепей

Под действием внешних процессов в линейной цепи возбуждаются как собственные, так и вынужденные колебания, наложение которых определяет собой нестационарный процесс в цепи.

Исследование нестационарных процессов проводят, опираясь на математическую модель цепи в форме дифференциального уравнения.

Простейшим сигналом, играющим при этом весьма важную роль в технических приложениях, является функция включения, называемая также функцией Хэвисайда, и представляющая собой единичный скачок:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Нестационарный процесс, возникающий в линейной цепи под действием такого ступенчатого сигнала, подаваемого на вход, принято называть переходным процессом. Этот термин подчеркивает, что в системе наблюдается переход из одного стационарного состояния в другое [9].

Пьезоэлектрический преобразователь описывается дифференциальным уравнением второго порядка. Успешность анализа нестационарного процесса в цепи часто определяется удачным выбором той динамической переменной, относительно которой составляется дифференциальное уравнение. Для пьезопреобразователей в режиме излучения такой переменной обычно является сила на излучающей поверхности (акустическое давление), а в режиме приема – напряжение на электродах преобразователя. Также, в качестве переменной, используется ток, протекающий через преобразователь. Исходное состояние цепи задано, если заданы начальные условия, накладываемые на искомую функцию и на ее производную. Пере-

ходной процесс в пьезопреобразователе полностью описывает решение задачи Коши.

Электрические цепи любого порядка служат примерами динамических систем, обладающих известной инерционностью. В случае пьезопреобразователя характерным временным масштабом является период его механических колебаний: $T = 1/f_0$.

Представляет большой интерес воздействие на цепь (в данном случае на преобразователь) источника такой импульсной э.д.с. $e(t)$, длительность которой $\tau_u \ll T$.

Оказывается, что реакция инерционной цепи на короткое импульсное воздействие зависит не от формы импульса, а лишь от его площади:

$$P_e = \int_0^{\tau_u} e(\xi) d(\xi). \quad (2)$$

При этом реакция цепи второго порядка на короткое импульсное воздействие:

$$x(t) = P_e \sum_{k=1}^2 A_k \exp(\gamma_k t), \quad (3)$$

где $\gamma_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$ корни характеристического уравнения $\gamma^2 + 2\alpha\gamma + \omega_0^2 = 0$, а

$$A_1 = \frac{1}{\gamma_1 - \gamma_2}; \quad A_2 = \frac{1}{\gamma_2 - \gamma_1}. \quad (4)$$

Физический смысл формулы (3) прост и нагляден – короткий импульс представляет собой толчок, возбуждающий все колебательные моды, свойственные рассматриваемой цепи. Амплитуды возбуждаемых мод пропорциональны площади входного сигнала и коэффициентам A_k . Математической моделью короткого импульса, возникающего в момент времени $t = 0$, равного нулю всюду за исключением этой точки, но тем не менее, имеющего единичную площадь, является так называемая δ – функция (функция Дирака):

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1, \quad (5)$$

или единичная функция. Реакция системы на входной сигнал в виде δ – функции называется импульсной характеристикой. Введя понятие импульсной характеристики цепи $h(t)$, можно получить очень полезную форму записи выходного сигнала при любой возбуждающей функции $f(t)$:

$$x(t) = \int_0^t f(\zeta) h(t - \zeta) d\zeta. \quad (6)$$

Реакция системы на функцию включения получила название переходной характеристики и особенно удобна для нахождения выходного сигнала для прямоугольных, трапецеидальных и многоступенчатых импульсов, длительность которых $\tau_u \sim T$.

Переходная характеристика находится по методу интеграла Фурье:

$$P_a(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(\omega) K(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega, \quad (7)$$

где $P_a(t)$ – акустическое давление на выходе преобразователя, $K(\omega) = K_{u0} \Phi_u(\omega) \cdot e^{i\phi_u(\omega)}$ – комплексная передаточная функция,

$$\sigma(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(t) e^{-i\omega t} dt = \int_0^{\infty} e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{\omega} e^{i\frac{\pi}{2}} \quad (8)$$

– комплексный частотный спектр функции включения.

Подставляя (8) в (7), беря вещественную часть $\sigma(\omega)$ и учитывая то, что

$$\cos\left[\omega t + \phi_u(\omega) + \frac{\pi}{2}\right] = \sin[\omega t + \phi_u(\omega)], \text{ получим:}$$

$$P_a(t) = \frac{K_{u0}}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\Phi_u(\omega)}{\omega} \sin[\omega t - \phi_u(\omega)] d\omega. \quad (9)$$

Подставляя в (9) нормированную частоту $x = \frac{f}{f_0}$, и нормированное время $y = \frac{t}{T_0} = t f_0$, получаем обобщенную нормированную переходную характеристику:

$$P(y) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\Phi_u(x)}{x} \sin(2\pi x y - \phi_u) dx, \quad (10)$$

тогда $P_a(t) = K_{u0} P(y)$, где $K_{u0} = 2e_{33}/l_0$; e_{33} – пьезоэлектрическая постоянная; l_0 – толщина пьезопластины.

Для приближенного расчета интеграл в выражении (10) заменяем суммой:

$$P(y_m) = \frac{1}{\pi} \sum_i \frac{\Phi_u(x_i)}{x_i} \sin(2\pi x_i y_m - \phi_{ui}) \Delta x, \quad (11)$$

где $x_i = \Delta x \cdot i$; $\Delta x = 0,02$; $i = 30 \dots 70$; $x_{30} = 0,6$; $x_{70} = 1,4$ для среднеполосного преобразователя; $y_m = 0,05m$; $m = 0 \dots 30$; $y_0 = 0$; $y_{30} = 1,5$ чтобы захватить полупериодный импульс.

Длительность импульса при расчете сразу выбирается равной половине периода собственных колебаний, т.е. $\tau = 0,5T$ или $y = 0,5$.

Переходная характеристика преобразователя находится по формулам:

$$\begin{cases} P(y) = P(y_m), & m = 0 \dots 10, \\ P(y) = P(y_m) + P(y_n) \cdot \left(\frac{P(y_2)}{P(y_6)} \right)^{-1}, & \\ m = 11 \dots 30; & n = m - 10. \end{cases} \quad (12)$$

2. Возбуждение коротких ультразвуковых импульсов узкополосным недемпфированным преобразователем без согласующих слоев

Вопрос получения одиночных ультразвуковых импульсов с целью увеличения точности измерения и повышения разрешающей способности импульсных ультразвуковых приборов уже рассматривался в [10]. Анализировались методы, основанные на использовании возбуждающих электрических импульсов специальной формы и применении электрических корректирующих цепей. Оба метода позволяют формировать одиночные импульсы с узкополосными преобразователями без применения механического демпфера. Основное требование, предъявляемое к таким пьезопреобразователям, по мнению авторов, заключается в том, чтобы на их амплитудно-частотных характеристиках был только один ярко выраженный максимум. Математическое выражение этого требования, необходимое для расчета акустической нагрузки, не приводится. Указывается лишь, что такому требованию отвечают преобразователи без электрических согласующих цепей и переходного слоя (или с тонким переходным слоем). Короткий звуковой импульс получается за счет возбуждения в преобразователях нескольких переходных процессов, частично компенсирующих друг друга. Это достигается подбором формы и длительности электрического возбуждающего импульса.

Отметим следующее:

Рассматривался преобразователь, работающий только на излучение, тогда как в медицинском эхоскопе после излучения он сразу переключается на прием.

Рассматривались генераторы импульсов для возбуждения преобразователей с частотой механического резонанса $f_0 = 700 \text{ кГц} \ll 2,5 \text{ МГц}$ – нижней частоты рабочего диапазона эхоскопов.

Генератор возбуждающих импульсов включал в себя и преобразователь, что для пьезопреобразователей эхоскопов, включающих в себя до 100 отдельных пьезоэлементов, не подходит.

Пьезопреобразователь работает без параллельной индуктивности.

Основное внимание при рассмотрении уделялось схеме формирования возбуждающего импульса. Мы же остановимся только на влиянии формы и параметров возбуждающих импульсов на форму УЗ импульса.

2.1. Ступенчатый импульс

Формы рассматриваемых импульсов представлены на рис.1. Форма возбуждающего импульса характеризуется тем, что знак перепада напряжения в моменты времени t_1 и t_2 одинаков. Это позволяет возбуждать акустический импульс с длительностью, равной или кратной половине периода свободных колебаний преобразователя. На это обстоятельство авторы [10] не обращают внимания, когда указывают, что недостатком генератора, формирующего такой импульс, является то, что в нем используется только половина напряжения.

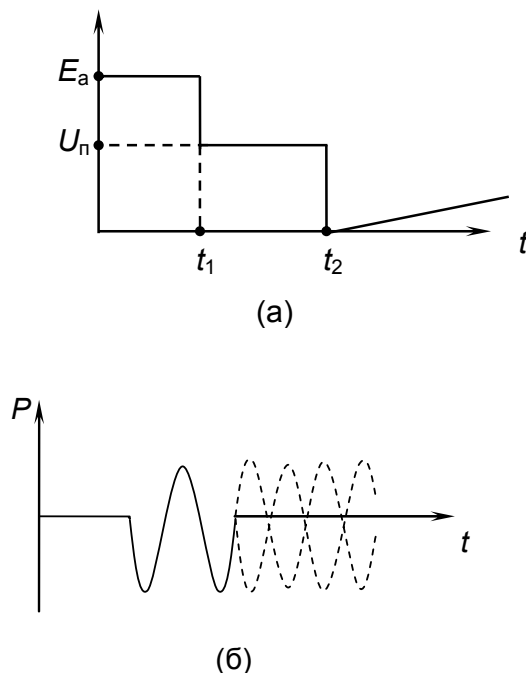


Рис. 1. Формы импульсов:

(а) электрического; (б) акустического

Изменением параметров элементов схемы можно было изменять в широких пределах как высоту U_n , так и ширину ступеньки $t_2 - t_1$. Этим можно добиться того, чтобы пьезоизлучатель излучал акустический импульс с длительностью, равной длительности ступеньки: в момент времени t_1 перепад напряжения $E_a - U_n$ возбуждает ультразвуковую волну с амплитудой A_1 . Если после интервала времени

$\tau = t_2 - t_1 = (2m + 1)T/2$, где $m=0,1,2,\dots$, возбуждать волну с амплитудой первого полупериода A_n , равной по величине амплитуде $(2m+1)$ -го полупериода первой волны, то из-за противофазности колебаний переходный процесс прекращается. При этом полагается, что

$$A_n = A_1 e^{-\alpha T \frac{2m+1}{2}}, \quad (13)$$

где α - коэффициент затухания, т.е. переходная характеристика является колебаниями, затухающими с первого полупериода. Осциллограмм никаких не приводится.

Следует заметить, что акустический импульс определяется первой волной.

2.2. Двухступенчатый импульс

При воздействии первой ступени электрического напряжения преобразователь излучает первый акустический импульс с длительностью, равной половине периода собственных колебаний преобразователя, а при воздействии второй ступени - второй акустический импульс такой же длительности и полярности, как у первого акустического импульса. Следует обратить внимание на то, что первая ступенька формируется перепадом напряжения ΔU_1 и части перепада ΔU_2 , а вторая - оставшейся частью ΔU_2 и перепадом ΔU_3 .

В механически недемпфированном пьезоприемнике такой сложный акустический сигнал возбуждают два экспоненциально-затухающих синусоидальных колебания, сдвинутые относительно друг друга на половину периода собственных колебаний преобразователя (рис.2). Из-за взаимной компенсации этих колебаний на выходе пьезоприемника получается электрический импульс с длительностью, равной половине периода собственных колебаний преобразователя. Этот интересный случай исследовался экспериментально с парой идентичных пьезопреобразователей из керамики ЦТС-19 с антирезонансной частотой $f_0 = 700$ кГц, работающих в воде. Осциллограмма выходных импульсов пьезоприемника приведена на рис.3 [10].

Этот вариант представляет интерес для преобразователя эхоскопа с кольцевыми элементами, число которых небольшое и электрический импульс подается от одного генератора через линии задержки.

2.3. Трапецеидальный импульс

В нем перепады напряжений имеют противоположный знак, поэтому минимальная дли-

тельность ультразвукового импульса, которую можно получить в результате компенсации волн, равна периоду колебаний $T = 1/f_0$. Однако, граница полосы частот такого импульса равна f_0 , т.е. в 2 раза меньше, чем у однополупериодного.

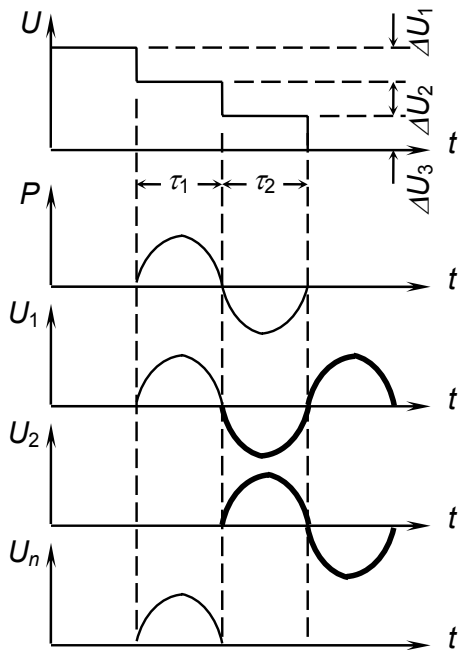


Рис.2. Получение электрического импульса с длительностью, равной половине периода собственных колебаний преобразователя



Рис.3. Осциллограмма выходного импульса пьезоприемника

Представляет интерес привести интерпретацию рассмотренного метода получения коротких ультразвуковых импульсов в работе [11], где анализировали широкополосные преобразователи следующих типов:

НТП – неравномерно поляризованный толстый преобразователь;

ПВТП – поверхностно возбуждаемый толстый преобразователь;

НПВТП – неравномерно поляризованный поверхностно возбуждаемый толстый пьезопреобразователь.

По мнению авторов [11], «широкополосность НТП, ПВТП и НПВТП позволяет излучать и принимать с их помощью короткие УЗ импульсы.

Однако, это свойство является следствием широкополосности лишь в том случае, если эти преобразователи – минимально-фазовые системы, т.е. такие, передаточная функция которых не имеет нулей или полюсов в правой полуплоскости (т.е. $|K(i\omega)| \neq 0$ или $|K(i\omega)| \neq \infty$ при $\text{Re}[K(i\omega)] > 0$). Передаточные функции НТП, ПВТП и НПВТП обладают этим свойством, так как их модули не равны ни нулю, ни бесконечности в правой полуплоскости».

Известно, что для минимально-фазовой системы существует связь между АЧХ и ФЧХ. Согласно работе [7], она имеет вид:

$$\arg K(i\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln |K(i\xi)|}{\xi - \omega} d\xi. \quad (14)$$

Если же четырехполюсник принадлежит к классу неминимально-фазовой цепи, то АЧХ и ФЧХ можно выбирать независимо друг от друга.

Согласно работе [9], если в интересующем диапазоне частот АЧХ имеет вид горизонтальной прямой, т.е. $K(\omega) = \text{const}$ (а именно этот случай фактически наблюдается у НТП, ПВТП и НПВТП), то $\phi(\omega_0) = 0$.

Если $K(\omega) = \text{const}$ и $\phi(\omega_0) = 0$, то спектр выходного сигнала совпадает со спектром входного воздействия. Поэтому при возбуждении указанных преобразователей коротким импульсом со стороны входа на выходе преобразователя будет наблюдаться такой же короткий импульс.

Существуют различные типы пьезопреобразователей, не являющимися минимально-фазовыми системами. Например, преобразователи с электрической компенсацией, при которой недемпфированный пьезоэлемент возбуждается двухступенчатым (или двойным колокообразным) электрическим импульсом, и преобразователь излучает короткий акустический импульс. Разработаны различные варианты этого метода, в частности, возможна электрическая компенсация свободных колебаний пьезоэлемента в режимах излучения и приема одновременно.

Выводы

Установлено, что недемпфированный пьезоэлектрический преобразователь, который является принципиально резонансной системой, при возбуждении с помощью электрических импульсов специальной формы, позволяет формировать короткие ультразвуковые импульсы. В медицинских диагностических эхоскопах, не использующих режим Допплера, такой преобразователь может быть использован как универ-

сальный. Широкодиапазонность его в режиме приема обеспечивается перестройкой индуктивности, компенсирующей стационарную емкость преобразователя.

Литература

1. *Найда С.А.* Принципы построения широкополосных ультразвуковых терапевтических излучателей // *Электроника и связь.* -2002. - №14. -С.35-38.
2. *Дидковский В.С., Найда С.А.* Новые широкополосные электроакустические приборы для медицины// *Электроника и связь.*-2010.- № 2.-С.211-216.
3. *Касаткин Б. Я., Павин Н. Я..* Сравнительный анализ и энергетические оценки широкополосных пьезопреобразователей// *Дефектоскопия.* -1979. -№1.- С. 61-66.
4. *Касаткин Б. Я., Павин Н. Я.* Многопараметровая оптимизация и энергетические оценки широкополосных преобразователей// *Акуст. журн.* -1980. - Т.26, №5. -С.721-726.
5. *Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.* Практическая оптимизация. -М.: Мир, 1985.-509с.
6. *Евтушенко Ю. Г.* Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. -М.: Наука, 1982. — 432с.
7. *Расстригин Л. А.* Статистические методы поиска. -М.:Наука, 1968.-376 с.
8. *Жилинскас А., Шалтянис В.* Поиск оптимума: компьютер расширяет возможности. — М.: Наука, 1989. — 128с.
9. *Баскаков С.И.* Лекции по теории цепей. — М.: Изд-во МЭИ, 1991. — 224с.
10. *Домаркас В.И., Кажис Р.-И.Ю.* Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. — Вильнюс: Минтис, 1975. — 258с.
11. *Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля./* Под ред. И.Н. Ермолова. — М.: Машиностроение, 1986. — 280с.

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»*

Поступила в редакцию 4 сентября 2012 г.