

Модель ультразвукового информационного канала с пьезокерамическими приёмопередатчиками

В.И. Капля, Я.Г. Казаку, Е.В. Чикризова, А.А. Соловьёва

Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета

Аннотация: В статье рассмотрена модель ультразвукового информационного канала связи, реализованного на основе пьезокерамических приёмопередатчиков. Модель построена на основе известной модели одиночного приёмопередатчика в виде эквивалентной RLC цепи путём введения резистивной связи между электрическими цепями двух приёмопередатчиков. Пьезокерамические элементы используются в области их собственных резонансных частот, что позволяет сопоставлять им колебательные контуры с реактивными и резистивными элементами. Выбор резистивной связи обусловлен тем, что энергия излучаемых ультразвуковых волн может быть представлена как энергия, которая рассеивается на резистивном элементе колебательного контура. Со стороны приёмника ультразвуковых волн естественно полагать, что принимаемая энергия так же поступает на резистивный элемент его колебательного контура. Имеется принципиальная возможность введения функциональной зависимости глубины резистивной связи от пространственной длины информационного канала и диаграммы направленности пьезокерамического приёмопередатчика. Проведено имитационное моделирование для оценки функциональности полученных соотношений. Построенные графические зависимости позволяют наглядно проиллюстрировать свойства предложенной модели.

Ключевые слова: пьезокерамический приёмопередатчик, электрическая модель пьезокерамического приёмопередатчика, схема, резонансная частота приёмопередатчика, сопротивление излучения.

Введение

Ультразвуковая техника является достаточно распространённой и динамично развивающейся отраслью с широкой областью применения: в медицине, гидрографии, химической промышленности, измерительной технике [1-4]. В основе практических приложений ультразвуковых приборов лежит процесс распространения ультразвуковых колебаний в заданной среде: воздухе, жидкости или твердом веществе. В настоящее время получили широкое распространение пьезоэлектрические приёмопередатчики, способные эффективно преобразовывать электрические колебания управляемого источника энергии в механические колебания, распространяющиеся в окружающей среде [5-7].

В большинстве технических приложений ультразвуковой техники необходимо решать как задачи излучения, так и задачи приёма ультразвуковых колебаний. Если система предназначена для проведения измерений параметров облучаемых объектов, то необходимость приёма и обработки излученного сигнала очевидна. Если ультразвуковой излучатель выполняет функцию активного силового воздействия на объект, то приём и обработка сигналов необходима для реализации замкнутого контура управления, позволяющего регулировать энергетические и пространственные параметры воздействия на объект облучения. Таким образом, взаимодействие излучателя и приёмника ультразвуковых сигналов целесообразно рассматривать как некоторый информационный канал, позволяющий получать данные о параметрах облучаемого объекта и окружающей среды.

Модель ультразвукового информационного канала

Пьезокерамические приёмопередатчики имеют распределенные электрические параметры, но в окрестности резонансных частот допустимо представление таких приёмопередатчиков с помощью дискретных элементов [1,2,8]. Распределённый характер электрических параметров пьезокерамики обуславливает наличие резонансных частот высокого порядка.

Пьезокерамический передатчик и приёмник для образования информационного канала должны иметь одинаковую резонансную частоту, поэтому допустимо полагать, что их реактивные параметры (индуктивности и ёмкости) совпадают по величине. На рис.1 представлена эквивалентная электрическая схема ультразвукового информационного канала, на которой передающему пьезокерамическому элементу принадлежат следующие компоненты схемы: C_1 , C_2 , R_1 , R_2 и L_1 . Второй принимающий пьезокерамический элемент включает компоненты схемы: C_3 , C_4 , R_4 , R_5 и L_1 .

В случае однотипных приёмопередатчиков $C_1 = C_4$, $C_2 = C_3$, $R_1 = R_5$, $R_2 = R_4$ и $L_1 = L_2$.

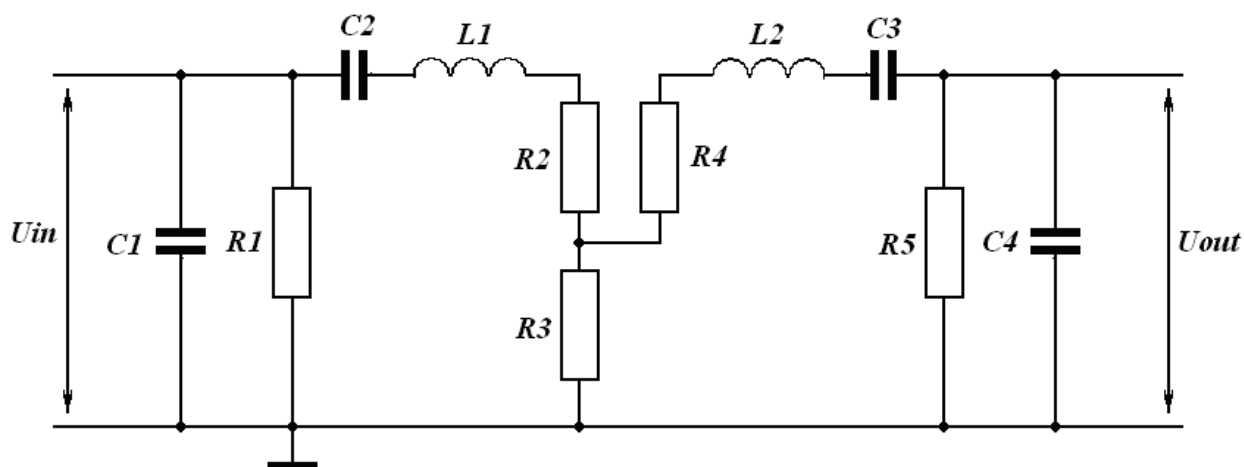


Рис.1. – Эквивалентная электрическая схема ультразвукового информационного канала: U_{in} – напряжение, подаваемое на передатчик, U_{out} – напряжение на выходе приёмника

Резистор R_3 является общим связующим элементом двух пьезокерамических приёмопередатчиков, которое в теории антенн принято называть “сопротивление излучения” [9]. Электрическая энергия, поступающая от источника напряжения (U_{in}), рассеивается на резисторах R_1 - R_5 , причем сопротивления резисторов R_1 и R_5 интерпретируют как факторы внутренних потерь утечки через пьезокерамический материал резонаторов. Электрическая энергия, рассеиваемая на резисторах R_2 - R_4 , должна интерпретироваться как доля энергии, преобразуемая в ультразвуковые колебания окружающей среды. Предлагаемая в статье модель ультразвукового информационного канала рассматривает резистор R_3 , как элемент связи между приёмником и передатчиком, который определяет долю излучаемой передатчиком энергии, которую получает приёмник через среду в виде энергии ультразвуковых колебаний. Сопротивления резисторов R_2 и R_4

целесообразно считать факторами рассеивания излучённой энергии, которая не попала в приёмник и была поглощена окружающей средой.

Полное сопротивление излучения передающего элемента равно:

$$R_{rT} = R_2 + R_3.$$

Величину энергии, получаемой приёмником, целесообразно характеризовать коэффициентом влияния пространственных свойств информационного канала и определить отношением:

$$k_S = R_3 / (R_2 + R_3) = R_3 / R_{rT}.$$

Диапазон изменения этого коэффициента: $k_S \in [0;1]$, так как очевидно, что при большом пространственном удалении $k_S \rightarrow 0$, а при максимальном сближении (прямом акустическом контакте) $k_S \rightarrow 1$. Естественно полагать, что мощность, излучаемая пьезокерамическим приёмопередатчиком, и его сопротивление излучения R_{rT} не зависит от его пространственного положения.

Важной характеристикой пьезокерамических приёмопередатчиков является диаграмма направленности, графики которой приводятся в технической документации на приёмопередатчики. Вектор углов $\bar{\alpha}$ взаимного ориентирования осей приёмника и передатчика непосредственно влияет на величину принимаемого сигнала. Квадрат величины расстояния между центрами пьезокерамического приёмника и передатчика L_{RT} обуславливает обратно пропорциональное убывание уровня принимаемого сигнала. Ультразвуковые волны часть своей энергии теряют из-за поглощения окружающей средой, что описывается коэффициентом поглощения среды ε . Таким образом, коэффициент k_S является функцией перечисленных выше величин: $k_S = k_S(\bar{\alpha}, L_{RT}, \varepsilon)$.

Коэффициент передачи по напряжению $K_U(w)$ для схемы на рис.1 может быть получен аналитически и имеет следующий вид:

$$K_U(\omega) = \frac{\left(j\omega C_4 + \frac{1}{R_5}\right)^{-1}}{\frac{1}{\frac{1}{j\omega C_4 + \frac{1}{R_5}} + \frac{1}{j\omega C_3 + \frac{1}{j\omega L_2 + \frac{1}{R_4}}} + \frac{1}{R_3}} + \frac{1}{j\omega C_2 + \frac{1}{j\omega L_1 + \frac{1}{R_2}}}}. \quad (1)$$

Выражение (1) позволяет провести численное моделирование ультразвукового информационного канала для различных значений частоты и сопротивления связи R_3 .

Численный эксперимент в среде моделирования LTC

Оценка функциональности полученной модели (1) была выполнена с помощью программного средства моделирования электронных устройств LTC фирмы Analog Device [10]. Первая задача моделирования состояла в получении переходной характеристики ультразвукового информационного канала при ступенчатом воздействии. Результат моделирования представлен на рис.2, содержащем графики входного и выходного сигналов.

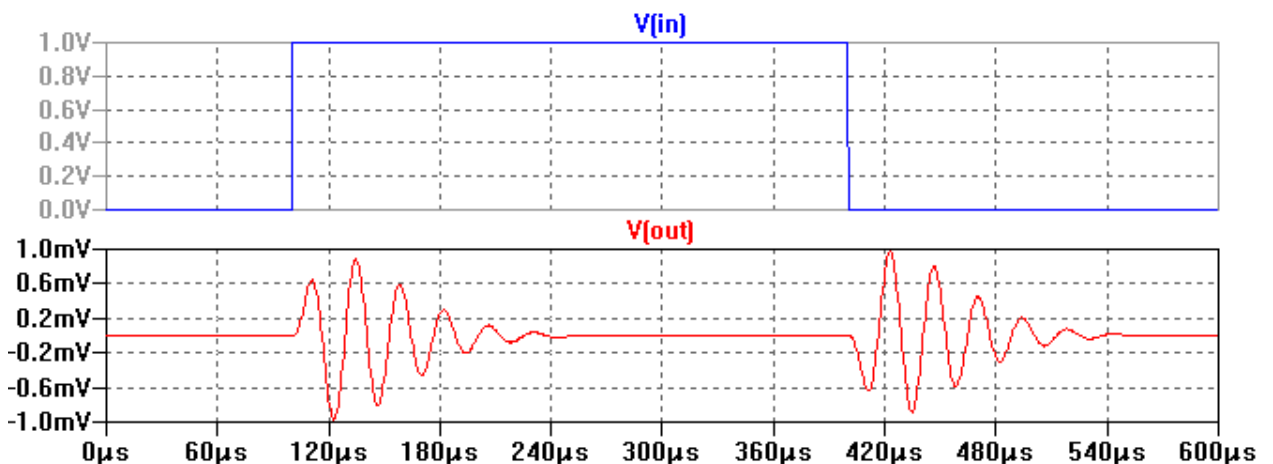


Рис.2. – Переходная характеристика приёмника $V(\text{out})$ при ступенчатом воздействии $V(\text{in})$ на передающий пьезоэлектрический элемент

Вторая задача моделирования состояла в получении амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ультразвукового информационного канала в окрестности резонансной частоты. Результаты моделирования представлены на рис.3, который содержит графики АЧХ для трёх различных значений сопротивления связи R_3 .

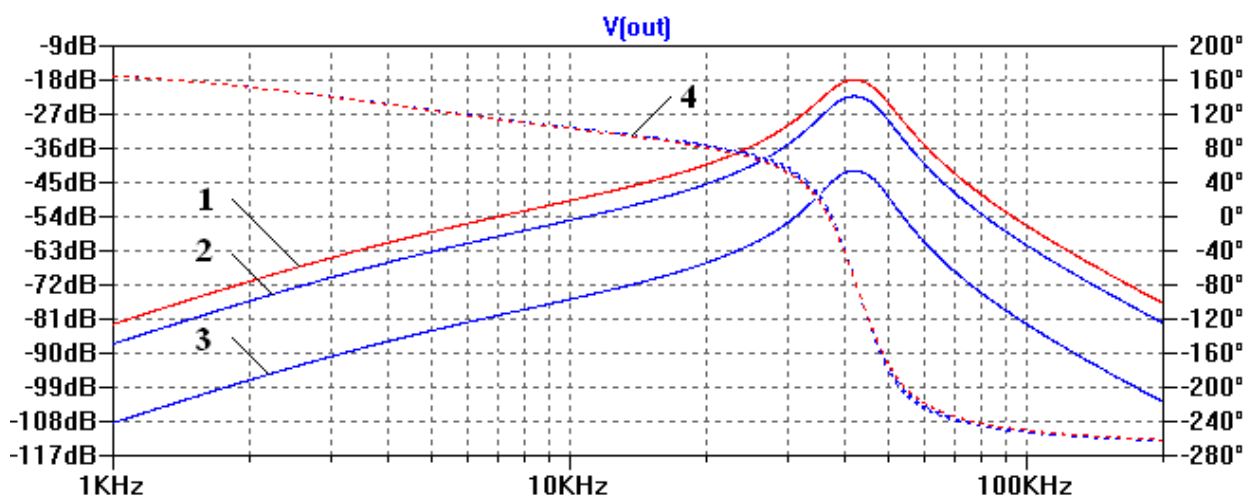


Рис.3. – АЧХ ультразвукового информационного канала: 1 – $R_3=21$ Ом,

2 – $R_3=11$ Ом, 3 – $R_3=1$ Ом, 4 – фазово-частотная характеристика

Полученные результаты моделирования подтверждают функциональность предложенной модели: переходная характеристика имеет выраженный колебательный характер, а АЧХ имеет область резонанса. Увеличение величины сопротивления связи между передатчиком и приёмником увеличивает коэффициент передачи по напряжению.

Выводы

Предложенная в статье модель ультразвукового информационного канала с пьезоэлектрическими приёмопередатчиками позволяет рассчитывать переходные и частотные характеристики на основе параметров

приёмопередатчиков с учётом диаграммы направленности, пространственной длины канала и коэффициента поглощения ультразвуковых волн в среде распространения.

Литература

1. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
 2. Ensminger D., Bond L.J. Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications. 3ed. CRC Press, Taylor & Francis Group. 2012. 728 p.
 3. Угольков А.В. Применение многоэлементных пьезопреобразователей при скоростной ультразвуковой дефектоскопии рельсов железнодорожного пути // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1579.
 4. Вахрушев В.В., Пойлов В.З., Косвинцев О.К., Федотова О.А. Кинетика обесшламливания сильвинитовой руды при ультразвуковой обработке // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1638.
 5. Astashev V.K., Babitsky V.I. Ultrasonic Processes and Machines: Dynamics, Control and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2007. 338 p.
 6. Ruiz A., Ramos A., San Emeterio J.L. Estimation of some transducer parameters in a broadband piezoelectric transmitter by using an artificial intelligence technique. // Ultrasonics. Elsevier B.V. N. 42. 2004. pp.459–463.
 7. Kumar S., Furuhashi H. Characteristics of an ultrasonic phased array transmitter in medium range. // Ultrasonics. N. 82. 2018. pp. 331–335.
 8. Church, D., Pincock, D. Predicting the Electrical Equivalent of Piezoceramic Transducers for Small Acoustic Transmitters. // IEEE Transactions on sonics and ultrasonics. Vol. SU-32, № I. JANUARY 1985. pp. 61-64.
-

9. Нечаев Ю.Б., Николаев В.И., Андреев Р.Н., Винокурова Н.Н. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии. Воронеж: ОАО Концерн «Созвездие», 2008. 629 с.

10. Володин В.Я. LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. СПб.: БХВ-Петербург. 2010. 400 с.

References

1. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. P'zojelektricheskie datchiki. [Piezoelectric sensors] М.: Tehnosfera, 2006. 632 p.
2. Ensminger D., Bond L.J. Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications. 3ed. CRC Press, Taylor & Francis Group. 2012. 728 p.
3. Ugol'kov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1579.
4. Vahrushev V.V., Pojlov V.Z., Kosvincev O.K., Fedotova O.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1638.
5. Astashev V.K., Babitsky V.I. Ultrasonic Processes and Machines: Dynamics, Control and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2007. 338 p.
6. Ruiz A., Ramos A., San Emeterio J.L. Ultrasonics. N. 42. 2004. pp.459–463.
7. Kumar S., Furuhashi H. Ultrasonics. N. 82. 2018. pp. 331–335.
8. Church, D., Pincock, D. IEEE Transactions on sonics and ultrasonic. Vol. SU-32, № I. JANUARY 1985. pp. 61-64.
9. Nechaev Ju.B., Nikolaev V.I., Andreev R.N., Vinokurova N.N. Antenny, [Antennas] SVCh-ustrojstva i ih tehnologii. Voronezh: ОАО Концерн «Созвездие», 2008. 629 p.
10. Volodin V.Ja. LTspice: komp'yuternoe modelirovanie jelektronnyh shem. [LTspice: computer modeling of electronic circuits] SPb.: BHV-Peterburg. 2010. 400 p.