

УДК 621.317

*А. В. Савенков, П. П. Першенков***НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ УРОВНЕМЕРОВ***A. V. Savenkov, P. P. Pershenkov***SOME ASPECTS OF DESIGN ULTRASONIC LEVEL METERS**

**А н н о т а ц и я.** *Актуальность и цели.* Целью статьи является анализ возможных решений для измерения уровня жидких веществ и предложение оптимальных способов для инновационного проектирования датчиков уровня жидких веществ, используемых для измерительных целей. *Материалы и методы.* Проанализирована аналогия между распространением волны в акустической среде и линией передачи, что позволяет описывать электромеханическую передачу сигнала в пьезоэлектрическом материале, который является основой рабочего элемента ультразвукового преобразователя. Задача предварительного моделирования ультразвуковых систем сводится к построению модели ультразвукового преобразователя с применением электрических компонентов, таких как линия передачи и управляемые источники тока и напряжения. *Результаты.* Предложена методика для компьютерного моделирования выходного сигнала с ультразвукового преобразователя на начальном этапе инженерного проектирования готового электронного изделия. *Выводы.* Предлагаются рекомендации по проектированию датчиков уровня жидких веществ с учетом возможностей компьютерного моделирования для гарантированной надежной работы в реальных условиях при решении измерительных задач различной сложности.

**A b s t r a c t.** *Background.* The aim of the article is to analyze the possible solutions for level measurement of liquids and demand urgent ways for the innovative design of the level of liquids sensors used in a variety of measurement tasks. *Materials and methods.* Was analyzed the analogy between the propagation of waves in an acoustic environment, and the transmission line that allows you to describe the electromechanical transmission signal in the piezoelectric material, which is the basis of the ultrasonic transducer operating element. preliminary ultrasound systems modeling problem reduces to the construction of the ultrasonic transducer using a model of electrical components, such as a transmission line and controlled sources of current and voltage. *Results.* A method for computer modeling of the output signal from the ultrasonic transducer at the initial stage of the engineering design of the finished electronic product. *Conclusions.* We offer advice on the design of liquid level sensors substances taking into account possibilities of computer simulation to ensure reliable operation in real conditions for solving measurement tasks of varying complexity.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** ультразвуковой преобразователь, линия передачи, модель Лича, акустическая волна, измерение.

**К e y w o r d s:** ultrasonic transducer, transmission line, Leach model, acoustic wave, measuring.

Задачи, требующие измерения уровня жидких продуктов, исключительно многообразны и встречаются в различных областях техники. Измерение уровня жидкости необходимо во многих производственно-технологических процессах, в системах экологического мониторинга и безопасности, для контроля массы, расхода жидких продуктов при их хранении и транспор-

тировке. Актуальность измерения уровня жидкостей возрастает по мере повышения степени автоматизации производственных процессов, систем контроля и учета.

По методам измерения уровня имеется большое число публикаций и в силу актуальности задачи их число продолжает расти [1–10]. Наиболее широко применяют приборы бесконтактного измерения уровня, например, ультразвукового типа. Применение ультразвука позволяет отказаться от механических трущихся частей в конструкции зондов и позволяет реализовать бесконтактный метод измерения. Принцип действия ультразвукового уровнемера основан на облучении контролируемой поверхности ультразвуковыми волнами и приеме отраженного сигнала. Ультразвуковой уровнемер состоит из излучателя и приемника. Излучатель испускает ультразвуковые волны, часть которых отражается от поверхности объекта измерения и возвращается назад в приемник, где фиксируется, преобразовывается, например, в цифровой код, который затем программно обрабатывается. Специализированное программное обеспечение позволяет из спектра отраженного сигнала выделять полезный сигнал и отфильтровывать ложные сигналы. При излучении ультразвуковых волн высокой мощности потери сигнала могут сводиться к нулю.

Сегодня современный уровнемер – это серьезный инструмент, который задает необходимую точность измерений и метрологические характеристики.

Разработка пьезоэлектрического уровнемера является сложной технической задачей, включающей знание физической акустики, аналоговой электроники, свойств материалов. Эта задача усложняется в связи с отсутствием доступной информации о частотных и тепловых характеристиках таких материалов. Оптимальная комбинация необходимых материалов может подбираться методом проб и ошибок, но этот процесс можно существенно сократить с помощью предварительного компьютерного моделирования. Компьютерное моделирование позволяет решить поставленную задачу посредством применения теоретических моделей, а также задачи, недоступные для прямого экспериментального изучения, которые также сложны и для теоретического анализа. Компьютерное моделирование позволяет устранить разрыв между анализом данных и экспериментом, что покрывает взаимную недостаточность эксперимента и теории. Компьютерное моделирование способно занять важное место в цепи от фундаментального исследования до инженерного проектирования [1]. Компьютерный эксперимент является новым и потенциально мощным инструментом. Путем объединения стандартной теории, эксперимента и компьютерного моделирования можно исследовать новые и нерешенные задачи.

В литературе были предложены электрические аналоги одномерной акустической волны. Мейсон [2] смоделировал электромеханические преобразователи со смешанной эквивалентной схемой. Редвуд [3] добавил линию передачи в модель Мейсона для получения информации об обратном переходном процессе в пьезоэлектрическом преобразователе. С помощью линии передачи можно представить временную задержку, необходимую механическому сигналу для прохождения с одной стороны преобразователя на другую. В модели Лича [4] используются контролируемые источники тока и напряжения. Лич математически приравнивает к нулю одно из электромеханических уравнений, представляя каждое из них в форме передаточных уравнений. Путмер [5] применяет линию передачи с потерями в модели Лича для получения акустического затухания. В данной работе применяется подход Путмера [5] для получения электрического аналога одномерной акустической волны распространяющейся через разные среды. Акустическое возмущение распространяется вдоль одного направления и состоит из продольных волн, которые нормальны к направлению распространения. Их амплитуды достаточно малы для сохранения их свойств в области линейной зависимости, в этом случае не нарушается принцип суперпозиции. Имея модуль эластичности и коэффициент поперечного сжатия, можно определить необходимые электрические параметры. Проверка теории проводится путем сравнения экспериментальных данных, полученных для различных сред при фиксированных частоте и температуре.

Пьезоэлектрический эффект можно смоделировать с применением регулируемого источника напряжения и тока (рис. 1) [4]. Эквивалентная схема включает постоянную емкость  $C_0$  (емкость между электродами), линию передачи (в роли механической части пьезоэлектрического передатчика) и два регулируемых источника тока и напряжения для связи между электрической и механической частями цепи.

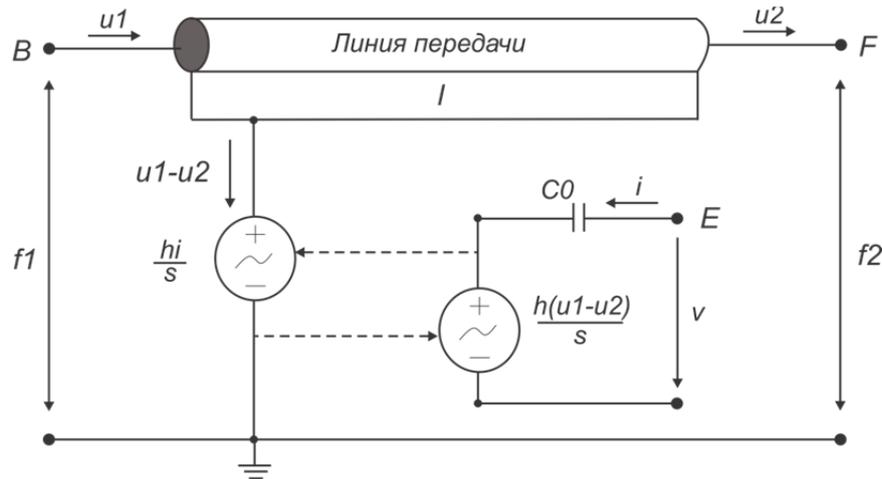


Рис. 1. Эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя (модель Лича):  
 $l$  – толщина;  $f$  – сила;  $u$  – скорость частицы;  $v$  – напряжение;  $i$  – ток;  
 $h$  – пьезоэлектрическая константа;  $s$  – оператор Лапласа [1]

Предположим, что ультразвуковой импульс перемещается через среду с конечной скоростью. Этот импульс может быть представлен как возмущение, на которое реагирует среда. В случае с продольной волной возмущение является сжатием или растяжением, в результате которого среда возвращается в состояние равновесия. Сжатие или растяжение в среде связаны с ее плотностью  $\rho$  и восстанавливающая сила связана со средним объемным модулем упругости  $M$  [6], а соотношение со скоростью можно представить в виде

$$c = \sqrt{\frac{M}{\rho}}. \quad (1)$$

По аналогии с электрической линией передачи электрический импульс может проходить через среду. Эти импульсы, распространяющиеся с определенной скоростью, принимаются на другом конце линии в виде очень коротких, но конечных промежутков времени. Подобно акустической волне, электрические импульсы концентрируются и рассеиваются на электронах в линии передачи [7].

В эквивалентной схеме (рис. 1) линия передачи описывается четырьмя основными параметрами:

- $R$  – это сопротивление в обоих проводниках на единицу длины;
- $L$  – это индуктивность в обоих проводниках на единицу длины;
- $G$  – это проводимость в диэлектрической области на единицу длины;
- $C$  – это емкость между проводниками на единицу длины.

$R$  и  $G$  обращаются в ноль в условиях без потерь (в идеальных условиях).

Эквивалентная схема линейного сегмента длиной  $\Delta x$  линии передачи с эквивалентной схемы (рис. 1) представлен на рис. 2 [1].

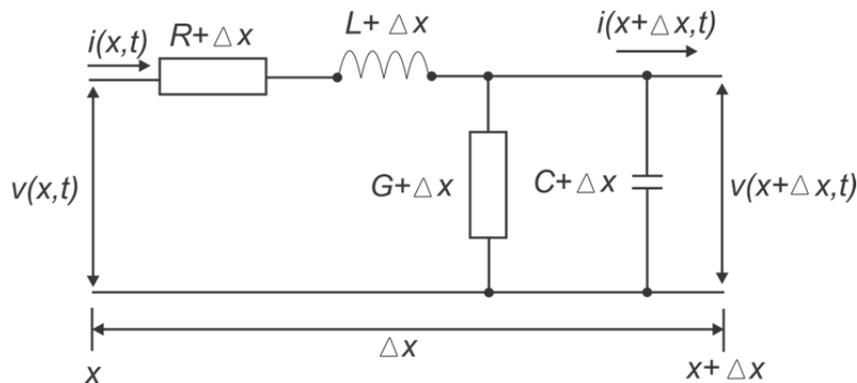


Рис. 2. Эквивалентная схема линейного сегмента длиной  $\Delta x$

Найдем эти четыре параметра ( $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$ ). При помощи закона Кирхгофа для напряжения имеем

$$v(x, t) - R\Delta x i(x, t) - L\Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} - v(x + \Delta x, t) = 0, \quad (2)$$

преобразуем полученное выражение к следующему виду:

$$-\frac{v(x + \Delta x, t) - v(x, t)}{\Delta x} = Ri(x, t) + L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (3)$$

решаем при  $\Delta x \rightarrow 0$  и получим

$$-\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = Ri(x, t) + L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}. \quad (4)$$

Теперь мы имеем одно уравнение, включающее  $R$  и  $L$ . Для получения еще одного уравнения с  $G$  и  $C$  применим закон Кирхгофа для тока и получим

$$i(x, t) - G\Delta x v(x + \Delta x, t), \quad (5)$$

$$-C\Delta x \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} - i(x + \Delta x, t) = 0, \quad (6)$$

решаем при  $\Delta x \rightarrow 0$  и получим

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = Gv(x, t) + C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}. \quad (7)$$

Дифференциальные уравнения первого порядка в частных производных (4)–(6) можно упростить, если напряжение  $v(z, t)$  и ток  $i(z, t)$  являются временными гармоническими функциями косинуса:

$$v(x, t) = \text{real}(V(x)e^{j\omega t}), \quad (8)$$

$$i(x, t) = \text{real}(I(x)e^{j\omega t}), \quad (9)$$

где  $\omega$  – угловая частота.

Подставим уравнения (8), (9) в уравнения (4), (5) соответственно и запишем следующим образом:

$$-\frac{dV(x)}{dx} = (R + j\omega L)I(x), \quad (10)$$

$$-\frac{dI(x)}{dx} = (G + j\omega C)V(x). \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) можно использовать для нахождения постоянной распространения и для характеристики сопротивления линии передачи. Путем дифференцирования уравнений (10) и (11) относительно  $z$  получим

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = \gamma^2 V(x), \quad (12)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = \gamma^2 I(x), \quad (13)$$

где  $\gamma$  – постоянная распространения,

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}, \quad (14)$$

здесь  $\alpha$  – коэффициент затухания (действительная часть постоянной распространения);  $\beta$  – фазовая постоянная линии (мнимая часть постоянной распространения).

Общее решение дифференциального уравнения имеет вид

$$V(x) = Ae^{-(\alpha+j\beta)x} + Be^{(\alpha+j\beta)x}. \quad (15)$$

Временная составляющая уравнения (15) может быть получена путем умножения на  $j\omega t$ :

$$V(x,t) = V(x)e^{j\omega t} = Ae^{-\alpha x} e^{j(\omega t - \beta x)} + Be^{-\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x)}. \quad (16)$$

Уравнение (16) описывает две бегущих волны: одна перемещается в положительном направлении с амплитудой  $A$ , пока другая – в противоположном направлении с амплитудой  $B$ . Обе волны рассеиваются при достижении уровня  $\alpha$ .

Эти же уравнения отвечают и за распространение акустической волны. В случае с гармоническими волнами (уравнения (12) и (13)) имеем линейные уравнения плоской акустической волны с потерями:

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} + k_c^2 p(x,t) = 0, \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + k_c^2 u(x,t) = 0, \quad (18)$$

где  $p(x,t)$  – давление,  $u(x,t)$  – скорость частицы [1]. Эквивалент  $\gamma$  – это  $k_c$  – сложное волновое число, составленное из коэффициента затухания  $\alpha$  и волнового числа  $k$ .

Основное решение волнового уравнения (17):

$$p(x,t) = Ae^{-\alpha x} e^{j(\omega t - kx)} + Be^{\alpha x} e^{j(\omega t + kx)}, \quad (19)$$

оно также идентично решению, полученному для уравнения (16) для линии передачи. Уравнение (18) имеет решение в такой же форме. Сложное волновое число  $k_c$  дает нам

$$k_c = \frac{\omega}{c} \frac{1}{\sqrt{1 + j\omega\tau}}, \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2} - 1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (21)$$

$$k_c = \frac{\omega}{c} \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2} + 1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (22)$$

При объединении этих двух теорий аналогия по типу импеданса выбрана, потому что механическая сила представлена напряжением, а ток представляет собой скорость частицы. Для непрерывности характеристики импеданса должны выполняться граничные условия, также как и для давления и нормальной скорости частицы. Для линии передачи с потерями [1] характеристика импеданса  $Z_{el}$  равна

$$Z_{el} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (23)$$

а за счет потерь в акустической среде характеристика акустического импеданса  $Z$ :

$$Z_a = \rho c \sqrt{1 + j\omega\tau}, \quad (24)$$

где  $\rho$  – плотность среды.

Преобразовываем уравнения (23) и (14) :

$$Z_{el} \cong \sqrt{\frac{L}{C}} \left[ 1 + \frac{1}{2j\omega} \left( \frac{R}{L} - \frac{G}{C} \right) \right], \quad (25)$$

$$\gamma \cong \frac{1}{2} \sqrt{LC} \left( \frac{R}{L} + \frac{G}{C} \right) + j\omega \sqrt{LC}. \quad (26)$$

Рассматривая мелкие, но не незначительные потери, где  $R \ll \omega L$ ,  $G \ll \omega C$  и  $\omega t \ll 1$ , второе составляющее уравнения (25) незначительное, и остается такая характеристика импеданса, как  $\sqrt{\frac{L}{C}}$ . Из уравнения (24) потери на акустической составляющей низки и импеданс может быть приравнен к  $pc$ . Также волновое число  $k$  из уравнения (22) можно приравнять к  $\omega/c$ . Для корреляции этих двух характеристик мы выбираем аналогию по типу импеданса (рис. 1), где сила (не давление) представляется напряжением, а скорость частицы – током. Тогда получим эквивалент между двумя системами:

$$Z_{el} \cong ZaA, \quad (27)$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения акустического луча.

После соответствующих преобразований получаем

$$L = Ap. \quad (28)$$

Действительная часть уравнения (24) – это коэффициент затухания:

$$C = \frac{1}{Ap c^2}, \quad (29)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \sqrt{LC} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{2} \sqrt{LC} \left( \frac{G}{C} \right) \right). \quad (30)$$

Проводя параллель с классической теорией акустического затухания, имеем

$$\alpha_{classical} = \alpha_v + \alpha_{tc}, \quad (31)$$

где  $\alpha_v$  – коэффициент затухания из-за вязких потерь;  $\alpha_{tc}$  – коэффициент затухания из-за тепловой проводимости.

Из уравнений (28)–(30) можно найти  $R$  и  $G$  для модели затухания, а именно:

$$R = 2pcA\alpha_v, \quad (32)$$

$$G = \left( \frac{2\alpha_{tc}}{pcA} \right). \quad (33)$$

Поскольку рассматриваемые здесь вещественные среды имеют низкую теплопроводность, то потери от теплопроводности незначительны, можно записать  $G = 0$ . Уравнения (28), (29), (31) можно назвать конечными для дальнейших задач компьютерного моделирования процессов.

Путем нехитрых математических операций значение параметра уровня можно легко преобразовывать в объемные и весовые параметры жидкостей в резервуарах, цистернах и т.д. в каждый момент времени.

Различают датчики уровня для сигнализации достижения предельных или заданных значений уровня рабочей среды – датчики предельного уровня или сигнализаторы уровня, а также датчики для непрерывного измерения уровня – уровнемеры или преобразователи уровня. Первый тип устройств обычно характеризуется цифровым логическим выходом, выход уровнемеров может быть аналоговым или цифровым. Выбор того или иного интерфейса зависит от решаемой задачи и от требований совместимости с системой управления [8].

При проектировании уровнемеров необходимо учитывать следующие особенности выходного сигнала:

- распространение волн в среде идет с конечной скоростью и зависит от температуры;
- волны могут рассеиваться и искажаться на присутствующих в среде частицах;
- турбулентность жидкости.

В заключение отметим, что вынесенная на рассмотрение аналогия между акустической средой и линией передачи, рассматриваемая в качестве способа для построения модели ультразвукового преобразователя с применением контролируемых источников тока и напряжения, обеспечивает возможность для моделирования процесса распространения акустической волны в среде с необходимым физическим принципом действия проектируемого устройства для гарантии надежной работы в реальных условиях и является залогом стабильного функционирования, а также качества конечного измерительного устройства.

#### **Список литературы**

1. Yogendra, B. Gandole Computer modeling and simulation of ultrasonic system for material characterization / B. Yogendra // Modeling and Numerical Simulation of Material Science. – 2011. – Vol. 1. – P. 1–13.
2. Mason, W. P. Electromechanical Transducers and Wave Filters / W. P. Mason // Van Nostrand. – New York, 1942.
3. Redwood, M. Transient Performance of a Piezoelectric transducer / M. Redwood // Journal of the Acoustical Society of America. – 1961. – Vol. 33, Issue 4. – P. 527.
4. Leach, W. M. Controlled-Source Analogous Circuits and SPICE Models for Piezoelectric Transducers / W. M. Leach // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 1994. – Vol. 41. – P. 60–66.
5. Puttmer, A. SPICE Model for Lossy Piezoceramic Transducers / A. Puttmer, P. Hauptmann, R. Lucklum, O. Krause and B. Henning // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 1997. – Vol. 44, № 1. – P. 60–66.
6. Kinsler, L. E. Fundamentals of Acoustics / L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders. – 3<sup>rd</sup> Ed. – Wiley ; New York, 1982.
7. Cheng, D. K. Field and Wave Electromagnetics / D. K. Cheng. – 2<sup>nd</sup> Ed. – Addison-Wesley, 1989.
8. Лявин, Ю. Сигнализаторы уровня производства НПК «ТЕКО» / Ю. Лявин // Критерии выбора и рекомендации по применению. Компоненты и технологии. – 2012. – № 1. – С. 42–45.
9. Соснин, Д. А. Разработка канала ИИС для измерения уровня жидкости ультразвуком / Д. А. Соснин, Ю. Г. Кузьмин // Ползуновский альманах. – 2014. – № 1. – С. 190–191.
10. Meribout, M. A new ultrasonic-based device for accurate measurement of oil, emulsion, and water levels in oil tanks / M. Meribout, M. Habli, A. Al-Naamany, K. Al-Busaidi // Instrumentation and Measurement Technology Conference. – 2004. – Vol. 3. – P. 1942–1947.

**Савенков Александр Валерьевич**

соискатель,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

**Savenkov Aleksandr Valer'evich**

applicant,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Першенков Петр Петрович**

кандидат технических наук, профессор,  
кафедра физики,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: peter@pnzgu.ru

**Pershenkov Petr Petrovich**

candidate of technical sciences, professor,  
sub-department of physics,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317

**Савенков, А. В.**

**Некоторые аспекты проектирования ультразвуковых уровнемеров** / А. В. Савенков, П. П. Першенков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 3 (17). – С. 54–60.