

4. Collado C. Analysis and Simulation of the Effects of Distributed Nonlinearities in Microwave Superconducting Devices [Text] / C. Collado, J. Mateu, J.M. O'Callaghan // IEEE Trans. on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15. – № 1. – P. 26–39.
5. Панченко Б.А. Микрополосковые антенны [Текст] / Б.А. Панченко, Е.И. Нефедов. – М.: Радио и связь, 1986. – 144 с.
6. Das N.K. A generalized spectral-domain Green's function for multilayer dielectric substrates with application to multilayer transmission lines [Text] / N.K. Das, D.M. Pozar // IEEE Trans. MTT. – 1987. – Vol. 35. – P. 326 – 335.
7. Tan E.L. A Unified Representation of the Dyadic Green's Functions for Planar, Cylindrical and Spherical Multilayered Biisotropic Media [Text] / E.L. Tan, S.Y. Tan // Progress In Electromagnetics Research (PIER). – 1998. – № 20. – P. 75–100.
8. Разевиг В.Д. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office [Текст] / В.Д. Разевиг, Ю.В. Потапов, А.А. Курушин. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
9. Sonnet User's Guide. Release 12 [Text]. – Syracuse, NY: Sonnet Software, Inc. – 2009. – 372 p.

*Дана робота присвячена сучасним дослідженням у галузі вимірювань швидкості поширення ультразвуку в рухомих середовищах. Використовується безперервне випромінювання амплітудно - модульованих ультразвукових коливань і фазовий метод вимірювання швидкості поширення звуку. Проаналізована похибка вимірювань*

*Ключові слова: ультразвукова хвиля, швидкість поширення, вимірювання*

*Данная работа посвящена современным исследованиям в области измерений скорости распространения ультразвука в движущихся средах. Используется непрерывное излучение амплитудно-модулированных ультразвуковых колебаний и фазовый метод измерения скорости распространения звука. Проанализирована погрешность измерений*

*Ключевые слова: ультразвуковая волна, скорость распространения, измерения*

*This work is devoted to contemporary research in the field of measuring of propagation velocity of ultrasonic vibration in the moving. Use continuous emission amplitude-modulated ultrasonic vibrations and the phase method of measuring of propagation velocity of ultrasonic vibration. Measurement error is analyzed*

*Keywords: ultrasonic wave, propagation velocity, measurements*

УДК 534.614

## МЕТОД ВЫСОКОТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ДВИЖУЩИХСЯ СРЕДАХ

**О.В. Зубков**

Кандидат технических наук, доцент\*

Контактный тел.: 097-232-31-97

E-mail: res@kture.kharkov.ua

**К.Н. Полтавский\***

Контактный тел.: 095-775-55-61

E-mail: poltava9\_1@mail.ru

**Г.И. Сидоров**

Кандидат технических наук, профессор\*

Контактный тел.: 067-793-36-46

E-mail: gennady.sydorov@gmail.com

\*Кафедра радиоэлектронных систем

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

### 1. Введение

В условиях современных промышленных предприятий актуальным является обеспечение постоянного оперативного контроля за ходом технологических процессов экологически опасных производств, когда прямые измерения невозможны или требуют применения большого количества датчиков разных параметров рабочей среды. В некоторых случаях температура и физико-химический состав воздуха в вентиляционных и выводных каналах могут характеризовать отклонение

от нормы хода технологических процессов, индикатором чего может служить величина измеряемой скорости распространения акустических колебаний в исследуемой среде и ее отклонение от типичной для данного типа производства.

### 2. Постановка задачи

Для высокоточного измерения скорости звука в газах в исследовательских целях используют интер-

ферометрические и оптические методы [1,2,3]. Однако практическая реализация основанных на этих методах измерителей с целью контроля производственных процессов затруднительна из-за сложности и громоздкости механических конструкций и невозможности автоматизированного съема данных с помощью электронных устройств. В [2] описан способ измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний в газах, жидкостях и твердых телах, заключающийся в том, что в исследуемую среду излучают короткие акустические импульсы с высокочастотным заполнением 1...10 МГц, измеряют время запаздывания импульса на участке точно известной длины между излучателем и приемником и определяют скорость звука  $V_s$  по формуле:

$$V_s = L / \Delta t,$$

где  $L$  - расстояние между передающим и приемным излучателями;  $\Delta t$  - время запаздывания импульса.

Недостатком этого способа является невозможность высокоточного измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний в движущихся средах, поскольку измеряемая величина содержит составляющую скорости движения среды. Поэтому актуальной является задача исключения влияния движения среды на точность измерений.

### 3. Подход к решению

Эта задача решается следующим образом. В исследуемую движущуюся среду излучают непрерывные амплитудно-модулированные ультразвуковые колебания, измеряют набег фазы отраженных от конца исследуемой среды колебаний на частоте модуляции и по измеренной разности фаз принятых и излученных колебаний определяют скорость распространения ультразвуковых волн. При этом составляющие разности фаз за счет скорости движения среды в прямом и обратном направлениях имеют противоположные знаки и поэтому компенсируются [4].

Измерение режима излучения с импульсного на непрерывный обеспечивает повышение отношения сигнал/помеха благодаря существенному уменьшению ширины полосы пропускания приемника (в  $10^5 \dots 10^6$  раз), что приводит к повышению точности измерений. Для однозначного измерения времени запаздывания, которое связано с фазой принятых колебаний, необходимо обеспечить однозначные измерения фазового сдвига  $\Delta\phi$  между излученными и принятыми колебаниями в пределах фазового интервала, равного  $2\pi$ .

$$\text{Поскольку } \Delta\phi = 2\pi f_m L / V_s = 2\pi L / \lambda,$$

где  $L$  - расстояние между излучающим и приемным электроакустическим преобразователями;  $\lambda$  - длина волны звуковых колебаний,

для однозначного измерения фазового сдвига  $\Delta\phi$  должно выполняться соотношение  $L < \lambda$ .

С точки зрения приемлемых габаритных размеров электроакустических преобразователей с острыми

диаграммами направленности желательно работать на частотах не ниже 1000 кГц, длина волны в этом случае в сухом атмосферном воздухе при  $V_s = 332 \text{ м/с}$  составляет

$$\lambda = \frac{V_s}{f_0} = \frac{332}{10^6} = 3,32 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,332 \text{ мм}.$$

В этом случае необходимо иметь расстояние между излучающим и приемным модулями примерно 0,3 мм, что конструктивно не осуществимо в системе, предназначенной для измерения скорости звука в вентиляционных каналах.

Из конструктивных соображений приемлемое расстояние  $L$  должно быть существенно больше, например  $L = 0,32 \text{ м}$ . В этом случае необходима рабочая частота:

$$f = \frac{V_s}{\lambda} = \frac{332}{0,332} = 1000 \text{ Гц}.$$

Такое значение рабочей частоты неприемлемо из-за невозможности изготовления электроакустических излучателей приемлемого размера с острыми диаграммами направленности, а также наличия в этом диапазоне промышленных акустических помех высокой интенсивности.

Налицо противоречивые требования: с одной стороны необходимо работать на высокой частоте (например, 1000 кГц, а с другой - на низкой (1кГц)). В радиолокации [5] для измерения дальности до объектов фазовым методом это противоречие разрешается применением колебаний низкой масштабной частоты, которые модулируют высокочастотный сигнал по амплитуде. При этом фазовые измерения выполняются на масштабной частоте.

Измеряемая скорость распространения звука при использовании фазового способа определяется по формуле:

$$V_s = \frac{2\pi f_m L}{\Delta\phi},$$

где  $f_m$  - масштабная частота.

Оценим точность данного способа значением суммарной среднеквадратичной погрешности измерения скорости. Поскольку в большинстве случаев измеряется не та величина, которая непосредственно интересует исследователя, а какая - либо другая (или их совокупность), зависящая от неё, необходимо анализировать погрешности не прямых измерений. Общее правило вычисления ошибки для случая не прямых измерений приведено в [6]. Если измеряемая величина  $y$  есть функция многих переменных  $x_i$

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_1, \dots, x_m),$$

то среднеквадратичная ошибка может быть рассчитана по формуле

$$\delta_y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta_{x_i}^2 \right)}.$$

В нашем случае

$$\delta_v = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial f_m} \delta_{f_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial L} \delta_L\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \Delta\phi} \delta_{\Delta\phi}^2\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{2\pi L}{\Delta\phi}\right)^2 \delta_{f_m}^2 + \left(\frac{2\pi f_m}{\Delta\phi}\right)^2 \delta_L^2 + \left(\frac{2\pi f_m L}{\Delta\phi^2}\right)^2 \delta_{\Delta\phi}^2}.$$

При использовании генератора, стабилизированного кварцем, относительная нестабильность частоты  $\delta f \approx 10^{-5}$ .

Тогда при  $f_m = 10^3$  Гц  $\delta_{f_m} = 10^{-5}$  Гц. Нестабильность расстояния  $L$  за счет возможных вибраций в воздухе  $\delta_L = 10^{-3}$ .

Потенциальная среднеквадратичная погрешность измерения фазового сдвига [5]

$$\delta_{\Delta\phi_{\text{инт}}} = \frac{1}{\sqrt{q}} [\text{рад}],$$

где  $q = \frac{P_c}{P_{\text{ш}}}$  - отношение сигнал/помеха по мощности на входе измерителя.

Инструментальная ошибка измерения фазы при использовании современных цифровых фазометров может быть уменьшена до  $(10^{-5} \dots 10^{-6})$  радиан благодаря применению АЦП с высокой разрядностью и может не учитываться. Таким образом, например, при

$$L = 0,332\text{м}, f_m = 10^3 \text{Гц} \quad \Delta\phi = \pi$$

$$\delta_v = \sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot 0,333}{\pi}\right)^2 \cdot 10^{-10} + \left(\frac{2\pi \cdot 10^3}{\pi}\right)^2 \cdot 10^{-6} + \left(\frac{2\pi \cdot 10^3 \cdot 0,332}{\pi^2}\right)^2 \cdot \delta_{\Delta\phi}^2}.$$

Первый и второй члены под корнем существенно меньше третьего.

Тогда

$$\delta_v = \frac{2\pi f_m \cdot L}{\Delta\phi^2} \cdot \delta_{\Delta\phi}.$$

В этом случае при  $\Delta\phi = \pi$

$$\delta_v = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 0,332}{\pi} \cdot \delta_{\Delta\phi} = 0,211 \cdot 10^3 \cdot \delta_{\Delta\phi}.$$

Если задаться необходимой для проведения исследований парогазовых смесей потенциальной ошибкой измерения скорости звука  $\delta_v = 0,01 \text{м/с}$ , допустимая потенциальная ошибка измерения фазы составит

$$\delta_{\Delta\phi} = \frac{\delta_v}{0,211 \cdot 10^3} [\text{рад}] = \frac{0,01}{0,211 \cdot 10^3} \approx 5 \cdot 10^{-5} [\text{рад}].$$

Для обеспечения такой среднеквадратичной погрешности необходимое соотношение сигнал/шум на входе измерителя по мощности

$$q = \left(\frac{1}{\delta_{\Delta\phi}}\right)^2 = 4 \cdot 10^8.$$

В диапазоне ультразвуковых частот 1000 кГц и выше мощность внешних акустических помех можно считать пренебрежимо малой по сравнению с внутренним тепловым шумом электронного измерителя [7],

мощность которых может быть рассчитана по известной формуле [5]

$$P_{\text{ш}} = k \cdot T_{\text{ш}} \cdot \Delta f,$$

где  $k = 1,23 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц} \cdot \text{К}}$  - постоянная Больцмана;  $T_{\text{ш}}$  - шумовая температура измерителя в градусах Кельвина;  $\Delta f$  - эквивалентная ширина полосы пропускания измерителя.

Допустим, что измерительное устройство работает при комнатной температуре  $T = 300$  К, при этом шумовая температура  $T_{\text{ш}} = 1200$  К, а для обработки непрерывного сигнала в фазовом детекторе достаточно иметь полосу пропускания шириной  $\Delta f = 100$  Гц.

Тогда

$$P_{\text{ш}} = 1,23 \cdot 10^{-23} \cdot 1200 \cdot 100 = 1,5 \cdot 10^{-18} \text{Вт}.$$

Для обеспечения отношения сигнал/помеха на входе приемника  $q = 10^8$  необходимо иметь сигнал на входе с мощностью  $P_c \leq q P_{\text{ш}} = 6 \cdot 10^{-10}$  Вт, что легко реализуется при расстоянии от излучателя до приемника  $L = 0,3\text{м}$ . Докажем это, рассчитав необходимую электрическую мощность генератора сигналов. Типовые средние значения коэффициента преобразования электрической энергии в акустическую в электроакустических преобразователях  $\eta = 5\%$ , а затухание звука в воздухе на частоте  $f$  определяется по формуле

$$\alpha \approx 4,24 \cdot 10^{-11} \cdot f^2 [\text{м}^{-1}].$$

На частоте 1000 кГц  $\alpha \approx 4,24 \frac{1}{\text{м}}$ .

Тогда необходимая электрическая мощность генератора сигналов с учетом коэффициентов преобразования излучателя и приемника

$$P_r = P_c : \eta^2 : \alpha = 6 \cdot 10^{-10} : 0,05^2 : 4,24 = 6 \cdot 10^{-5} \text{Вт},$$

что легко реализуется.

На несущей частоте

$$f = 10 \text{МГц} \quad P_r = 6 \cdot 10^{-3} \text{Вт}.$$

На рисунке приведена структурная схема ультразвукового измерителя, реализующего описанные выше измерительные функции. Высокочастотный ультразвуковой сигнал, который вырабатывается генератором 1, промодулированный по амплитуде с помощью модулятора 2 напряжением масштабной частоты 3, усиливается усилителем 4 и излучается с помощью излучателя 5 в исследуемую среду, пройдя через которую и отразившись от отражателя 6 поступает на вход электроакустического преобразователя 7, усиливается в усилителе 8 и детектируется в амплитудном детекторе 9, с выхода которого модулирующий сигнал масштабной частоты поступает на вход фазового детектора 10, на другой вход которого подается опорное напряжение с другого входа генератора масштабной частоты. С выхода фазового детектора напряжение, пропорциональное разности фаз между принятым и отраженным сигналами, поступает на вход вычисли-

тельного блока 11, в котором вычисляется значение скорости распространения ультразвуковых колебаний.

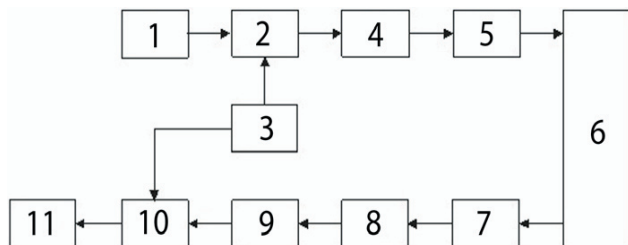


Рис. 1. Структурная схема ультразвукового измерителя скорости распространения ультразвуковых колебаний в движущихся средах

Возможность и эффективность применения ультразвуковых измерителей для исследования физических характеристик атмосферного воздуха и различных парогазовых смесей основывается на эффектах сильного взаимодействия акустических волн с атмосферным воздухом. Оно намного сильнее, чем для электромагнитных волн большинства областей спектра и поэтому может быть использована достаточно простая аппаратура. Чувствительность взаимодействия электромагнитных и звуковых волн с атмосферным воздухом можно оценить величиной флуктуации показателя преломления среды  $n$ , то есть отношением фазовой скорости в исследуемой среде к фазовой скорости в стандартных условиях. Значения величины измеренного показателя преломления в  $N$  единицах, где  $N = (n - 1) \cdot 10^6$  при измерении температуры и влажности таковы [7]:

Звуковые волны  $\Delta N = 1700$  на 1 К,  
 $\Delta N = 140$  на 1 мб,

Радиоволны  $\Delta N = 1$  на 1 К,  
 $\Delta N = 4$  на 1 мб.

В настоящее время накоплен большой экспериментальный материал по измерению скорости звука в газах [1,2,3]. В газах и парах умеренной плотности скорость звука уменьшается с ростом молекулярной массы. Наибольшее значение скорости звука при температуре  $0^\circ\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении наблюдается в водороде  $V_s = 1284 \text{ м/с}$  и наименьшее значение  $V_s = 157 \text{ м/с}$  в йодистом водороде, находящемся в газообразном состоянии.

В идеальном газе фазовая скорость звука прямо пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры и не зависит от давления. В реальных газах и парах при не очень высоких давлениях величина скорости растет с ростом температуры. Температурный градиент скорости при  $273\text{K}$  в большинстве случаев лежит в интервале  $0,3 \div 0,8 \text{ м/с} \cdot \text{К}$ . Скорость звука в атмосферном воздухе определяется температурой и влажностью, причем вклад водяного пара в фазовую скорость звука составляет величину на порядок меньшую вклада температуры, поэтому определение влажности требует высокоточных измерений скорости звука.

#### 4. Выводы

В результате проведения данного исследования можно сделать вывод, что, измеряя скорость звука, можно определить степень отличия измеряемых парогазовых смесей от характерных для данного типа производства в нормальном режиме эксплуатации. Исследования в данном направлении имеют практическую ценность и будут продолжены с целью определения количества различных примесей в парогазовых смесях. Для этого предлагается выполнить теоретические исследования функциональных зависимостей скорости распространения звука от химического состава парогазовых смесей с использованием значений молярных масс воздуха, воды и различных примесей.

#### Литература

1. Бергман, Л. Ультразвук и его применения в науке и технике [Текст] / Л. Бергман. – М. : Издательство иностранной литературы, 1957. – 728 с.
2. Ноздрев, В.Ф. Молекулярная акустика [Текст] : учеб. / В.Ф. Ноздрев, Н.В. Федорищенко. – М. : Высшая школа, 1974. – 288 с. – Библиогр. : с. 286 – 288.
3. Колесников, А.Е. Ультразвуковые измерения [Текст] / А.Е. Колесников. – М. : Издательство стандартов, 1970. – 240 с.
4. Патент України на винахід UA92949, МПК – 2011.01. Спосіб вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань у середовищах, що рухаються [Текст] / Сидоров Г.И. (Україна) G01N29/02; заявл. 05.01.2009; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24. – 3 с.
5. Белоцерковский, Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства [Текст] / Г.Б. Белоцерковский. – М.: «Сов. радио», 1975. – 336 с.
6. Зайдель, А.Н. Ошибки измерений физических величин [Текст] / А.Н. Зайдель. – Л. : Наука, 1974. – 108 с.
7. Красненко, Н.П. Акустическое зондирование атмосферы [Текст] / Н.П. Красненко. – Новосибирск : Наука, 1986. – 168 с.