

УДК 681.121:621.643.8

## МОДЕЛЮВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНОГО ВИМІРЮВАЧА ШВИДКОСТІ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ

*Й. Й. Білинський,<sup>1</sup> М. В. Гладисhevський,<sup>2</sup> В. Б. Бурдейний<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти й газу, вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: [yosyp.bilynsky@yandex.ru](mailto:yosyp.bilynsky@yandex.ru)

<sup>2</sup>Філія Центр метрології та газорозподільних систем НАК «Нафтогаз України», вул. Маяковського 49а, м. Боярка, 08150, e-mail: [mgladyshevskiy@yahoo.com](mailto:mgladyshevskiy@yahoo.com)

*В роботі наведені результати моделювання ультразвукового амплітудно-частотного методу вимірювання витрат плинних середовищ і вимірювального перетворювача на його основі. Результати моделювання показали високу дієздатність запропонованого методу та завдяки досягненню великої кількості проведення вимірювань за секунду часу стверджувати про його високі метрологічні характеристики.*

*Ключові слова: ультразвук, ближня зона, витрата, швидкість потоку, ультразвуковий перетворювач, амплітуда, частота.*

*В работе наведены результаты моделирования ультразвукового амплитудно-частотного метода измерения расхода текучих сред и измерительного преобразователя на его основе. Результаты моделирования показали высокую дееспособность предложенного метода и благодаря большому количеству измерений за секунду времени утверждать о его высоких метрологических характеристиках.*

*Ключевые слова: ультразвук, ближняя зона, расход, скорость потока, ультразвуковой преобразователь, амплитуда, частота.*

*In this article the modeling results of ultrasonic amplitude-frequency method for flowing medium flow rate measurement and measuring transducer on its basis are given. Modeling results have shown high efficiency of the proposed method and by achieving a high number of measurements per second to state about its high metrological characteristics.*

*Keywords: ultrasonic, near zone, flow rate, speed of flow, ultrasonic transducer, amplitude, frequency.*

Протягом останніх років значно виросло використання ультразвукових витратомірів для комерційного обліку природного газу. Різноманітність технологічних умов використання витратомірів, підвищення вимог щодо їх точності та надійності зумовило розроблення нових методів і засобів на їх основі. На сьогодні майже на кожному об'єкті газотранспортної мережі та на багатьох об'єктах газорозподільних мережах використовується технологія ультразвукового вимірювання, а також вимірювального контролю витрат для комерційних та технологічних потреб. [1]

Проведений аналіз існуючих методів і засобів ультразвукового вимірювання витрат плинних середовищ [2] показує, що найбільш широкого застосувані витратоміри мають ряд недоліків пов'язаних з залежністю швидкості звуку від густини вимірювального середовища,

наявністю мертвої зони при невеликому діаметрі газопроводу, що вимагає додаткових конструктивних рішень, показниками адіабати тощо. Тому на сьогодні більша увага приділяється розробці нових або модифікації існуючих методів на основі впровадження мікропроцесорної обробки сигналів, що дає змогу будувати витратоміри з високими метрологічними характеристиками та широкою сферою застосування. Правильність вибраних принципів роботи вимірювальних перетворювачів витрат та їх побудови необхідно перевірити шляхом математичного та віртуального моделювання.

Метою роботи є підтвердження роботи запропонованого ультразвукового методу вимірювання витрат плинних середовищ шляхом проведення моделювання

вимірювального перетворювача, який реалізує даний метод.

В роботі [3] описано запропонований новий амплітудно-частотний метод вимірювання швидкості плинних середовищ, в основі якого лежить залежність частоти акустичного сигналу від швидкості поширення ультразвукової хвилі при максимальній амплітуді вихідного сигналу в межах ближньої зони ультразвукового перетворювача [4].

Частота ультразвукового сигналу при максимальному значенні амплітуди за потоком визначається як

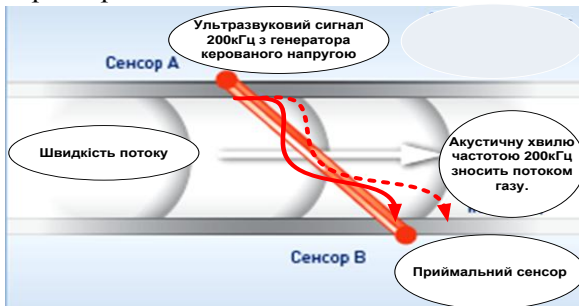
$$f = \frac{D V_{uzx} + V \cos \alpha}{a^2 \sin \alpha}, \quad (1)$$

де  $D$  – діаметр трубопроводу;  
 $V$  – швидкість потоку;  
 $a$  – радіус випромінювача;  
 $V_{uzx}$  – швидкість звуку.  
 $\alpha$  – кут між напрямком поширення ультразвукової хвилі та газовим потоком, то

витрати плинного середовища в такому випадку визначаються як

$$Q = 0,25\pi \Delta f D V a^2 t g \alpha. \quad (2)$$

На рис. 1 схематично показано поширення ультразвукової хвилі в ультразвуковому перетворювачі

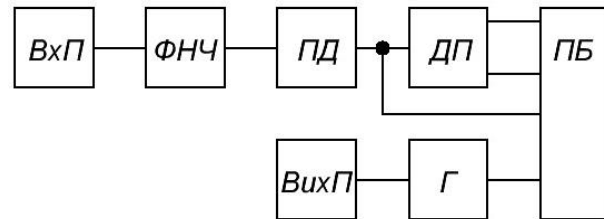


**Рисунок 1 – Загальна схема принципу роботи ультразвукового витратоміру**

Ультразвуковий сигнал проходить по діагоналі від одного п'єзоелемента до іншого й при певній його частоті, що відповідає швидкості потоку, амплітуда сигналу буде максимальною, оскільки такий стан відповідає умові ближньої зони. При зміні швидкості потоку зменшується амплітуда. Для відновлення максимального значення амплітуди необхідно змінити частоту сигналу у відповідності з умовою ближньої зони. [6]

Для реалізації запропонованого методу розроблена структурна схема ультразвукового

амплітудно-частотного витратоміра, вимірювальний канал якого показано на рис. 2.

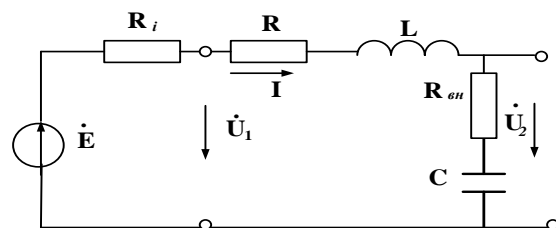


**Рисунок 2– Структурна схема вимірювального каналу ультразвукового амплітудно-частотного витратоміра (Розробка автора)**

Сигнал з п'єзоприймача поступає на вхід вхідного підсилювача (ВхП), далі підсилений сигнал поступає на вхід фільтра нижніх частот (ФНЧ), а далі – на вхід пікового детектора (ПД), амплітудне значення якого вимірюється та записується мікропроцесорним блоком (ПБ). Для підвищення точності вимірювання використовується диференційний підсилювач (ДП). Частота генератора (Г) задається мікропроцесорним блоком, сигнал з генератора підсилюється вихідним підсилювачем (ВихП) та надходить на п'єзоелектричний передавач.

Для підтвердження роботи такого засобу вимірювання необхідно дати відповідь на ряд питань, відповіді на які можна отримати шляхом проведення моделювання роботи вимірювального перетворювача. Для цього використаємо смуговий фільтр як модель системи газопроводу з двома п'єзоелементами, де резонансна частота фільтра пропорційна швидкості потоку газу.

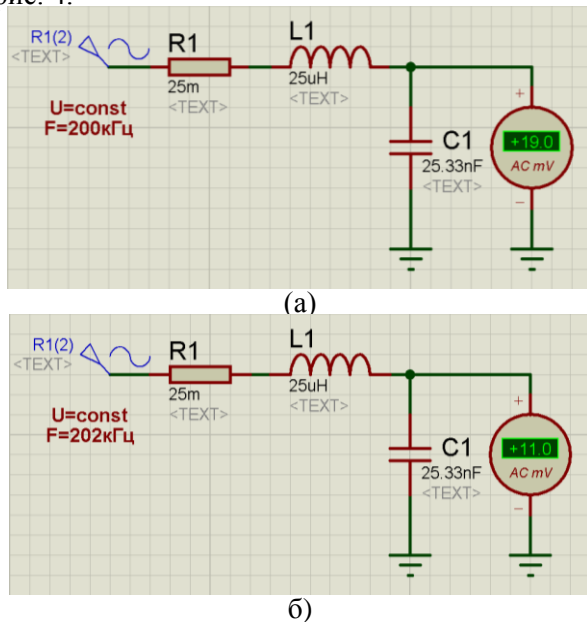
Еквівалентна схема вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ, реалізована на основі смугового фільтра, показана на рис. 3.



**Рисунок 3 – Еквівалентна схема ультразвукового амплітудно-частотного вимірювального перетворювача швидкості плинних середовищ (Складено автором на основі [7])**

Для попередньої перевірки дієздатності схеми, зібрано її віртуальну модель у середовищі ISIS Proteus 7.7. Схема моделювання

амплітудно-частотного витратоміра показано на рис. 4.

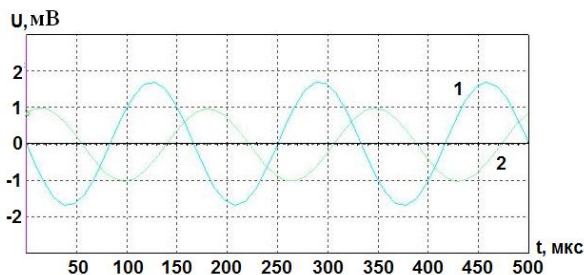


**Рисунок 4 – Схеми моделювання роботи амплітудно-частотного витратоміра;**  
а) амплітуда сигналу в момент резонансу; б) амплітуда сигналу у відсутності резонансу (Розробка автора)

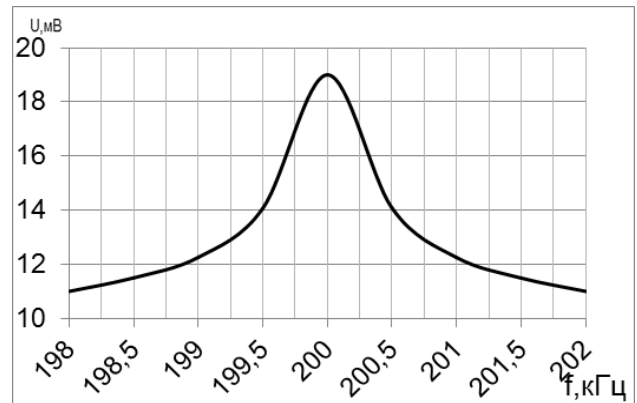
Для знаходження мінімальної частоти перебудови генератора необхідно визначити мінімальне значення зміни амплітуди сигналу в результаті порушення умови резонансу, що відповідає зміні швидкості потоку.

На основі експериментальних даних отримано ширину максимуму сигналу що складає 4-6 кГц, діапазон напруг при цьому становить 10 мВ при резонансній напрузі - 19 мВ.

На рис. 5 показані резонансна часова характеристика 1 та характеристика при неузгодженості фільтра 2, що становить 2 кГц.



**Рисунок 5 – Характеристика генератора та коливального контуру (Розробка автора)**  
АЧХ такого фільтра показано на рис 6.



**Рисунок 6 – АЧХ смугового фільтра з резонансною частотою 200кГц (Розробка автора)**

Амплітудно-частотна характеристика еквівалентної схеми відповідає коефіцієнту передачі напруги  $K_c(\omega)$  контуру, залежить від частоти джерела та параметрів елементів і визначається співвідношенням

$$K_{UC} \omega = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{r \sqrt{1 + \left( \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right)^2}} \cdot \frac{\omega_0}{\omega}, (3)$$

де  $\omega$  - циклічна частота,  $\omega_0$  - циклічна частота резонансу,  $L$ ,  $C$ ,  $r$  - основні параметри елементів контуру

Величина зміни амплітуди сигналу при мінімальній неузгодженості фільтра відповідає значенню молодшого розряду АЦП і визначається як

$$U_{\text{АЦП}} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}} - \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{r \sqrt{1 + \left( \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right)^2}} \cdot \frac{\omega_0}{\omega}, (4)$$

Напруга молодшого розряду АЦП повинна бути значно більша за рівень шуму. Оскільки рівень шуму становить близько 10мкВ, молодший розряд АЦП повинен забезпечувати чутливість 100мкВ, що відповідає 14-ти розрядному АЦП. Це означає, що налаштування генератора можна виконувати з частотою 1 Гц.

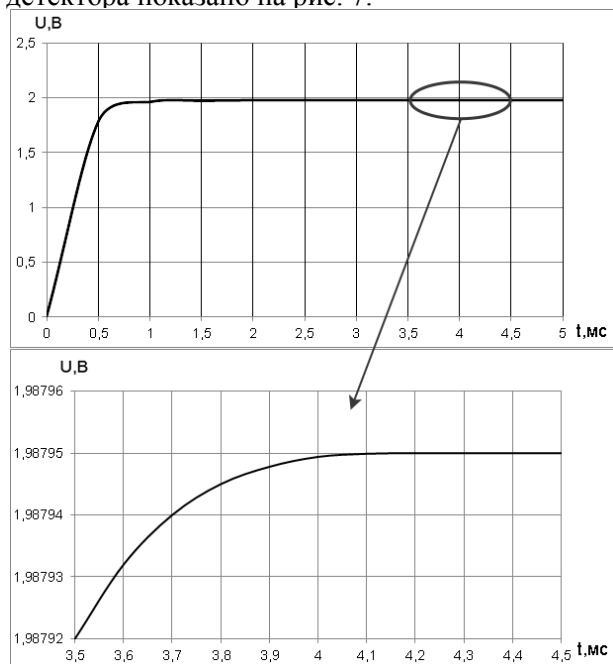
Для вимірювання максимальної напруги сигналу необхідно використати піковий детектор. Тому при подальшій розробці алгоритму роботи ультразвукового витратоміра необхідно дослідити перехідну характеристику, так як необхідно враховувати час реакції

системи на зміну частоти, що розраховується за формулою

$$T_n = T_2 + T_3 + T_{\text{ник}} \quad (5)$$

де  $T_2$  – час налаштування частоти генератора,  $T_3$  – час проходження звукової хвилі через плинне середовище,  $T_{\text{ник}}$  та час наростання амплітуди на виході пікового детектора.

Графік перехідної характеристики пікового детектора показано на рис. 7.



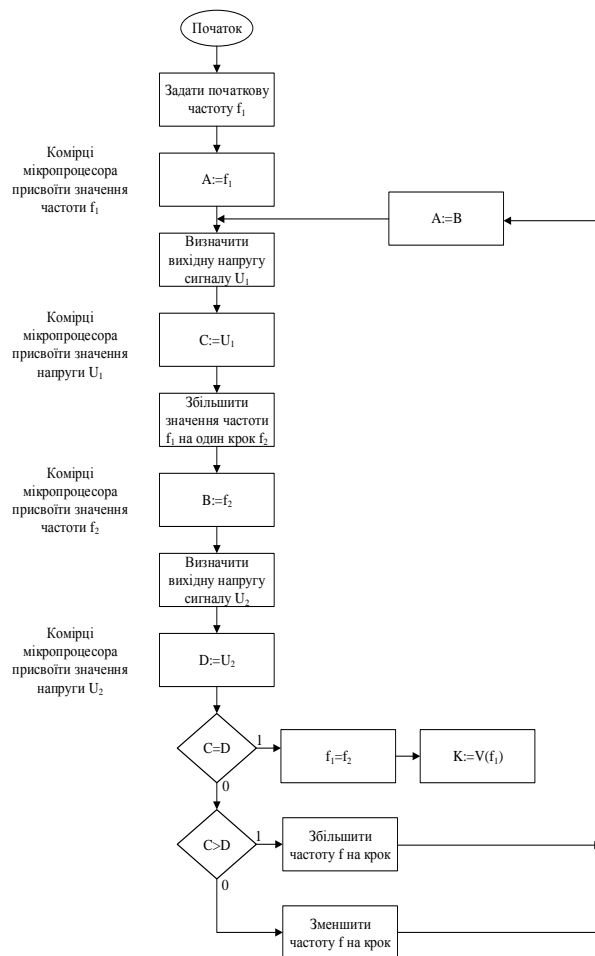
**Рисунок 7 – Перехідна характеристика вимірювального перетворювача (Розробка автора)**

Із даних графіка видно, що через 3,7 мс амплітуда сигналу досягає значення 1,98794 В, після чого коливається в межах від 1,98794 В до 1,98795 В. Амплітуда коливань сягає 10 мкВ. Час наростання амплітуди на піковому детекторі становить 4 мс.

Таким чином, час реакції системи на зміну частоти генератора складатиме  $T_n \approx 6 \text{ мс}$ .

Оскільки час проходження звукової хвилі через газове середовище залежить від тиску, температури та швидкості потоку газу, то його значення в середньому становить 0,8 мс при діаметрі газопроводу 15-25 мм. Час перебудови частоти генератора складає 1 мс. Це означає, що за допомогою такого засобу можна отримати від 60 до 80 вимірів в секунду.

Запропонований метод вимагає застосування мікропроцесорної обробки за спеціальним алгоритмом. На рис. 8 показано алгоритм мікропроцесорної обробки вимірювання швидкості потоку, який працює наступним чином.



**Рисунок 8 – Алгоритм мікропроцесорної обробки вимірювання швидкості потоку [8]**

Задається значення початкової частоти випромінювання акустичного сигналу  $f_1$ , яке присвоюється певній комірці мікропроцесора. Далі визначається вихідна напруга  $U_1$ , значення якої також заноситься до комірки мікропроцесора. Далі відбувається збільшення частоти  $f_1$  на один крок до частоти  $f_2$  з присвоєнням цього значення наступній комірці мікропроцесора. Відповідно зі зміною частоти відбувається зміна вихідної напруги, яка далі визначається як  $U_2$  та зберігається в комірці мікропроцесора.

У випадку нерівності вихідних напруг змінюється значення частоти на один крок. Якщо  $U_1 > U_2$ , частота збільшується на один крок. Якщо  $U_1 < U_2$ , значення частоти зменшується на один крок. Процес циклічно повторюється до моменту рівності даних значень напруг. Отримане значення частоти або різниці частот й слугуватиме мірою відображення швидкості потоку в даний момент часу.

## ВИСНОВКИ

Проаналізувавши контроль за допомогою УЗ ФР, можна зробити висновок, що дана методика незамінна при експертному контролі, для швидкого пошуку порушень цілісності, а також для виявлення дефектів, несприятливо орієнтованих до зазначеного в нормативно-технічному документі кутку.

За допомогою УЗ ФР можна визначити характер дефекту, що дозволить більш якісно судити про його критичності. Для визначення реальних розмірів дефекту необхідно розробити спеціальне програмне забезпечення для обробки зображень (очищення від шуму). Незважаючи на необхідність доопрацювання даної технології, вона є перспективним напрямком розв'язання оберненої задачі розсіювання ультразвукової енергії від дефекту, що дозволяє вивести дефектоскопію зварних з'єднань на новий рівень.

1.Щупак І.В. Сучасні підходи до вимірювання об'єму та об'ємної витрати природного газу / І.В. Щупак, О.М. Чернищенко, Н.М. Андрійшин, Р.З. Негреба // *Нафтогазова галузь України*. – 2014. - № 5. – С. 39-41.  
2.Білінський Й.Й. Аналіз ультразвукових засобів вимірювального контролю витрати плинних середовищ / Й.Й. Білінський, М.В. Гладішевський // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 2016. – №2. – С. 23-29.  
3.Білінський Й.Й. Новий ультразвуковий метод вимірювання

витрат плинних середовищ / Й.Й. Білінський, М. В. Гладішевський // *Нафтогазова галузь України*. – 2016. – №2. – С. 35-39.  
4.Крюков И.И. О раз мере ближней зоны плоских ультразвуковых преобразователей, находящихся на одной оси // *Акустический журнал*. – 1995. – Том 41, №1. – С. 101–105.  
5.Lansing J. Principles of operation for ultrasonic gas flow meters // *American school of gas measurement technology*. – 2003. – P. 50-60.  
6.Андрійшин М.П. Облік природного газу: довідник / М.П. Андрійшин, О.М. Карнаш, Я.С. Марчук, І.С. Петришин, О.Є. Середюк, С.А. Чеховський. – Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. – С. 32.  
7.Аналоговые измерительные устройства [Электронный ресурс]: Полосовые фильтры. – Режим доступу: <http://analogii.ru/6/6-5-2-3.html>. – Назва з екрану.  
8.Білінський Й.Й. Алгоритм мікропроцесорної обробки вимірювання швидкості потоку / Й.Й. Білінський, М.В. Гладішевський // *Тези X Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка»*. – 5-7 жовтня 2016.

Поступила в редакцію 03.11.2016 р.

Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Лютак І.З., докт. техн. наук, проф. Середюк О.Є.