



УКРАЇНА

(19) UA (11) 40767 (13) A

(51) 7 G01F1/66

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС

### ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

видається під  
відповідальність  
власника  
патенту

#### (54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РІДИНИ АБО ГАЗУ В ТРУБОПРОВОДІ

(21) 99105472

(22) 07.10.1999

(24) 15.08.2001

(46) 15.08.2001, Бюл. № 7, 2001 р.

(72) Лежов Ростислав Станіславович

(73) ЄФРЕМОВ ВІКТОР ЄВГЕНОВИЧ, ІГНАТ-  
ЧЕНКО МАКСИМ ГРИГОРОВИЧ, ЛЕЖОВ РОС-  
ТИСЛАВ СТАНІСЛАВОВИЧ

(57) 1. Спосіб вимірювання швидкості рідини або газу в трубопроводі за допомогою двох п'єзоелектричних датчиків, який полягає у вимірюванні часу проходження акустичних сигналів від одного п'єзоелектричного датчика до другого навпроти руху рідини або газу (T1) і в напрямку цього руху (T2), який **відрізняється** тим, що для підвищення точності вимірюють додатково також час повернення перших відбитих сигналів на перший (T11) і другий (T22) датчики, що їх випромінювали, а швидкість V течії рідини або газу визначають за формулою:

$$V = \frac{L}{\cos \alpha} \cdot \frac{T1 - T2}{(T11 - T1 + T22 - T2)^2},$$

де: L - шлях акустичного сигналу в рідині або газі, що рухається,

$\alpha$  - кут між вектором швидкості V течії рідини або газу і напрямком проходження акустичного сигналу.

2. Спосіб вимірювання швидкості рідини або газу за п. 1, який **відрізняється** тим, що часові проміжки T1, T2, T11 і T22 вимірюють шляхом підрахунку кількості імпульсів височастотного електричного сигналу стабільної частоти за інтервал часу між моментом випромінювання і подією отримання відповідних прямих і відбитих акустичних сигналів.

3. Спосіб вимірювання швидкості рідини або газу за п. 2, який **відрізняється** тим, що часові проміжки T1, T2, T11 і T22 вимірюють шляхом підрахунку кількості імпульсів височастотного електричного сигналу стабільної частоти за інтервал часу, що відповідає певній кількості циклів випромінювання.

4. Спосіб вимірювання швидкості рідини або газу за п. 1, який **відрізняється** тим, що часові проміжки T1, T2, T11 і T22 вимірюють шляхом пошуку максимуму кореляційної функції сигналів, що були випромінювані, та відповідних прямих і відбитих акустичних сигналів, що були отримані.

5. Спосіб вимірювання швидкості рідини або газу за п. 1, який **відрізняється** тим, що різницю часових проміжків T1 і T2 вимірюють шляхом пошуку максимуму кореляційної функції відповідних акустичних сигналів, що були отримані.

Винахід відноситься до вимірювальної техніки, а саме, до техніки вимірювання швидкості руху та витрати рідини або газу за допомогою імпульсних акустичних сигналів.

Відомі та широко розповсюджені вимірювачі витрати рідини за допомогою двох п'єзоелектричних елементів, які по чергову виконують функції випромінювача та приймача акустичних сигналів [1]. Вони мають загальну особливість: акустичні сигнали проходять в потоці рідини один і той же шлях L від одного датчика до другого навпроти напрямку руху рідини та в напрямку руху рідини за різні проміжки часу T1 і T2, різниця котрих прямо пропорційна швидкості руху рідини. Для компенсації впливу на результат вимірювання швидкості розповсюдження звуку в рідині або газі (котра змінюється з тем-

пературою, тиском і залежить від хімічного складу середовища) застосовують відомий вираз для розрахунку швидкості:

$$V = \frac{L}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \frac{T1 - T2}{T1 \cdot T2}, \quad (1)$$

де  $\alpha$  - кут між вектором вимірюваної швидкості та напрямком проходження акустичного сигналу. Формула (1) є вирішенням наступної системи рівнянь

$$\begin{cases} V_{\text{зв}} - V \cos \alpha = L / T1 \\ V_{\text{зв}} + V \cos \alpha = L / T2 \end{cases}, \quad (2)$$

шляхом виключення швидкості звуку  $V_{зв}$ , як невідомої змінної величини.

Основна проблема таких вимірювань є в тому, що вимірювані значення часових проміжків  $T_1$  і  $T_2$  завжди більші за справжні затримки  $\tau_1$  і  $\tau_2$ , які виникають через проходження акустичних сигналів крізь потік рідини. Для реальних приладів звичайно можна записати:

$$\begin{aligned} T_1 &= \Delta_{из1} + \Delta_{ст1} + \tau_1 + \Delta_{ст2} + \Delta_{пр2}; \\ T_2 &= \Delta_{из2} + \Delta_{ст2} + \tau_2 + \Delta_{ст1} + \Delta_{пр1} \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\Delta_{из1}$ ,  $\Delta_{из2}$  - власні затримки першого і другого випромінювачів;

$\Delta_{пр1}$ ,  $\Delta_{пр2}$  - власні затримки першого і другого приймачів;

$\Delta_{ст1}$ ,  $\Delta_{ст2}$  - затримки, що виникають під час проходження акустичних сигналів через стінки корпусів відповідних п'єзоелектричних елементів або тіло трубопроводу (якщо п'єзоелектричні елементи розташовані зовні).

При обчисленні (чи безпосередньому вимірюванні) різниці  $T_1 - T_2$  складові  $\Delta_{ст1}$ ,  $\Delta_{ст2}$  повністю знищуються. Основу власної затримки приймача складають: а) затримка підсилювача сигналу, що приймається (разом з поворотом фази в активних елементах і фільтрах) і б) затримка перетворення сигналу в цифрову форму (затримка компаратору чи час перетворення в АЦП). Основу власної затримки випромінювача складає затримка в логічних елементах синхронізації сигналу, що випромінюється, та затримка вихідного потужного вентиля. Якщо використовують спільний для двох п'єзоелектричних елементів канал підсилення і один електронний формувач сигналу, що випромінюється, то часткові різниці  $\Delta_{из1} - \Delta_{из2}$  і  $\Delta_{пр1} - \Delta_{пр2}$  можуть бути нехтовно малими. Тому у виразі (1) практично точно можна вважати:

$$T_1 - T_2 = \tau_1 - \tau_2. \quad (4)$$

При обчисленні добутку  $T_1 \times T_2$  всі додаткові затримки перемножуються одна на одну та складаються з одним знаком, що призводить до великих похибок визначення швидкості за формулою (1).

Найбільш близьким до запропонованого винаходу є спосіб вимірювання витрати рідини [2], який полягає у вимірюванні часу проходження акустичних сигналів від одного п'єзоелектричного елемента до другого навпроти руху рідини або газу ( $T_1$ ) і в напрямку цього руху ( $T_2$ ) та в обчисленні швидкості руху рідини або газу за формулою (1). Цей спосіб передбачає часткову компенсацію похибок, що згадані вище, за допомогою застосування додаткового компенсаційного циклу вимірювання, в якому відбувається пряме вимірювання затримок  $\Delta_{из1} + \Delta_{пр1}$  і  $\Delta_{из2} + \Delta_{пр2}$  з наступним їх віддаленням з виразу (3) розрахунковим шляхом.

Прототип має недостатню точність: а) в додатковому компенсаційному циклі вимірювання неможливо врахувати вплив затримок  $\Delta_{ст1}$  і  $\Delta_{ст2}$  вимірювального ланцюга повністю вилучається ділянка розповсюдження сигналу в акустичній формі; б) результат виміру затримок  $\Delta_{из1} + \Delta_{пр1}$  і  $\Delta_{из2} +$

$\Delta_{пр2}$  в додатковому компенсаційному циклі вимірювання не може в точності відповідати робочому режиму витратоміру, бо узгодження рівнів електричних сигналів на виході потужного вентиля випромінювача і на вході підсилювача приймача потребує вживання додаткових ланок (наприклад, подільника напруги чи перетворювача рівнів), які вносять власні затримки, відсутні в робочому режимі.

Задачею цього винаходу є підвищення точності вимірювання швидкості рідини або газу в трубопроводі шляхом повного виключення впливу на результат вимірювання часу проходження акустичних сигналів у стінках трубопроводу та більш ефективною компенсації власних затримок випромінювача і приймача безпосередньо в робочому режимі вимірювання.

Задача винаходу вирішується шляхом доповнення процедури вимірювання часу проходження акустичних сигналів від одного п'єзоелектричного елемента до другого навпроти руху рідини або газу ( $T_1$ ) і в напрямку цього руху ( $T_2$ ) вимірюванням часу повернення перших відбитих сигналів на перший ( $T_{11}$ ) і другий ( $T_{22}$ ) п'єзоелектричні елементи, що їх випромінювали, а швидкість  $V$  рідини або газу визначають відповідно до формули:

$$V = \frac{L}{\cos \alpha} \cdot \frac{T_1 - T_2}{(T_{11} - T_1 + T_{22} - T_2)^2}, \quad (5)$$

де  $L$  - шлях акустичного сигналу в рідині або газі, що рухається,  $\alpha$  - кут між вектором швидкості руху рідини або газу і напрямком проходження акустичного сигналу.

Для вимірювання часових проміжків  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{11}$  і  $T_{22}$  необхідно застосовувати метод, який забезпечував би достатню точність і роздільну здатність на рівні 0,05... 0,50 нс при середніх значеннях проміжків часу 100...1000 мкс. Наведемо основні шляхи вирішення цієї задачі.

Проміжки часу  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{11}$  і  $T_{22}$  можна вимірювати шляхом підрахунку кількості імпульсів високочастотного електричного сигналу стабільної частоти за інтервал часу між моментом випромінювання і подією отримання відповідних прямих і відбитих акустичних сигналів. Достатньої роздільної здатності можна досягти завдяки надвисокій частоті заповнення або застосовуючи багато циклів вимірювання для кожного з параметрів  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{11}$  і  $T_{22}$  з наступним усередненням результатів. Роздільна здатність цього методу дорівнює періоду частоти заповнення, поділеному на корінь квадрата від кількості циклів вимірювань.

Суттєво зменшити частоту заповнення і кількість циклів вимірювання проміжків часу  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_{11}$  і  $T_{22}$  можна шляхом підрахунку кількості імпульсів високочастотного електричного сигналу стабільної частоти за інтервал часу, що відповідає певній кількості циклів випромінювання. При цьому кожний новий акустичний сигнал в серії випромінюється безпосередньо після отримання акустичного сигналу, який було випромінено у циклі, що йому передував. Роздільна здатність цього методу дорівнює періоду частоти заповнення, поділеному на кількість циклів вимірювань в серії.

Проміжки часу  $T_1, T_2, T_{11}$  і  $T_{22}$  можна вимірювати шляхом пошуку максимуму кореляційної функції сигналів, що були випромінені, та відповідних прямих і відбитих акустичних сигналів, що були отримані [3]. Цей метод дозволяє отримати достатню роздільну здатність всього за один цикл випромінення, якщо шукати максимум кореляційної функції за її аналітичною апроксимацією.

Ще більшу точність і роздільну здатність за один цикл випромінювань можна отримати, якщо вимірювати безпосередньо різницю часових проміжків  $T_1$  і  $T_2$  шляхом пошуку максимуму кореляційної функції відповідних акустичних сигналів, що були отримані. При цьому завдяки ідентичності спектрів отриманих сигналів кореляційна функція стає більш гострою і симетричною, що полегшує процес пошуку її максимуму і зменшує релаксаційні похибки.

Запишемо вирази, які визначають затримки часу отримання перших відбитих сигналів:

$$T_{11} = \Delta_{11} + \Delta_{11} + \tau_1 + \tau_2 + \Delta_{11} + \Delta_{11}; \quad (6)$$

$$T_{12} = \Delta_{12} + \Delta_{12} + \tau_2 + \tau_1 + \Delta_{11} + \Delta_{11};$$

Якщо підставити у вираз (5) значення параметрів  $T_1, T_2, T_{11}$  і  $T_{22}$  з виразів (3) і (6), отримуємо:

$$V = \frac{L}{\cos \alpha} \cdot \frac{\tau_1 - \tau_2}{(\tau_1 + \tau_2)^2}, \quad (7)$$

Таким чином досягнуто новий технічний результат, а саме: вимірювання швидкості руху рідини або газу відповідно з фінішною формулою (7) не має складових, які пов'язані з часовими затримками у випромінювачі, приймачі та у стінках трубопроводу, а тому не має й похибок, які спричинені вільною зміною цих затримок у часі і з температурою.

На фігурі 1 наведено приклад виконання витратоміру, тобто вимірювача швидкості рідини або газу в трубопроводі фіксованого діаметру, в котрому може бути застосовано спосіб, який запропоновано у даному винаході.

Витратомір має в своєму складі цифровий управляючий пристрій 1, формувач 2 сигналу, що випромінюється, підсилювач-перетворювач 3 сигналу, що приймається, комутатори напрямку випромінення 4 і 5, корпус 6 датчика витратоміру, в котрому розташовані п'єзоелектричні елементи 7 і 8.

Суттєвою є вимога, щоб робочі поверхні п'єзоелектричних елементів 7 і 8, а також поверхні корпусу 6 датчика витратоміру, що безпосередньо до них прилягають і відокремлюють їх від потоку рідини або газу, лежали б на вісі проходження акустичного сигналу, були б перпендикулярні до цієї вісі і, в наслідок цього, були б паралельні один до одного. Кармани (як показано на фігурі 1) або виступи у корпусі 6 датчика витратоміру у місцях кріплення саме надають можливість задовольнити цю вимогу.

Витратомір працює наступним чином. Цифровий управляючий пристрій 1 (функції котрого може виконувати мікрокомп'ютер, однокристальний мікроконтролер або ж логічна цифрова схема) формує на своєму сигнальному виході OUT елект-

ричний сигнал вільної форми з певними параметрами. Довжина цього сигналу повинна бути меншою загального часу проходження акустичного сигналу від одного п'єзоелектричного елемента до другого туди й назад через рідину або газ, що рухається, а спектральний склад повинен відповідати смузі пропускання п'єзоелектричних елементів 7 і 8. Цей сигнал може бути: а) поодиноким прямокутним імпульсом; б) регулярною послідовністю однакових прямокутних імпульсів; в) псевдовипадковою (по довжині імпульсів і пауз між ними) послідовністю прямокутних імпульсів; г) аналоговим сигналом загального вигляду, тобто зі змінною амплітудою, фазою і частотою. Надалі цей сигнал підсилюється формувачем 2 сигналу, що випромінюється, і надходить через комутатор 4 на п'єзоелектричний елемент 7 або 8 (в залежності від напрямку випромінення). Сигнал, який прийнято іншим п'єзоелектричним елементом (відповідно, 8 або 7), через комутатор 5 надходить на підсилювач-перетворювач 3, котрий в найпростішому випадку може бути звичайним підсилювачем-обмежувачем або компаратором, а в більш інтелектуальних приладах - швидкодіючим аналого-цифровим перетворювачем. Вихід підсилювача-перетворювача 3 підключено до входу IN цифрового управляючого пристрою 1. Вихід DIR цифрового управляючого пристрою 1 з'єднано з входами управління комутаторів напрямку випромінення 4 і 5, і, таким чином, рівень логічного сигналу на цьому виході визначає напрямок випромінення.

Цифровий управляючий пристрій 1 виконує вимірювання проміжків часу  $T_1, T_2, T_{11}$  і  $T_{22}$  (а також безпосередньо  $T_1 - T_2$ ) і обчислення за формулою (4). Спосіб вимірювання вказаних проміжків часу, який реалізується в цифровому управляючому пристрої 1, не має значення для даного винаходу, але залежить від точності, яку необхідно досягти, та від конкретної реалізації підсилювача-перетворювача 3.

У найпростіших приладах, де застосовано підсилювач-перетворювач 3 у вигляді компаратора чи тригера Шмітта, цифровий управляючий пристрій 1 звичайно виконує вимірювання проміжків часу шляхом підрахунку кількості імпульсів високо-частотного електричного сигналу стабільної частоти за один цикл випромінення, середньої кількості імпульсів за кілька циклів випромінення або загальної кількості імпульсів за певне число циклів випромінення, що слідує безпосередньо один за одним.

Більш високої точності та роздільної здатності можна досягти в приладах, де застосовано підсилювач-перетворювач 3 у вигляді АЦП, а цифровий управляючий пристрій 1 виконує вимірювання проміжків часу шляхом пошуку максимуму кореляційної функції відповідних сигналів, що були випромінені й отримані.

Можлива побудова приладу, який має підсилювач-перетворювач 3 у вигляді компаратора чи тригера Шмітта, а цифровий управляючий пристрій 1 виконує вимірювання проміжків часу шляхом пошуку максимуму кореляційної функції. Високої точності таким чином теж можна досягти, але за рахунок більш довгих у часі і складних сигналів, що випромінюються, та відповідно більш складних і довгих обчислювальних операцій підчас розра-

хунків кореляційних функцій, що потребує застосування цифрового управляючого пристрою 1 високої потужності.

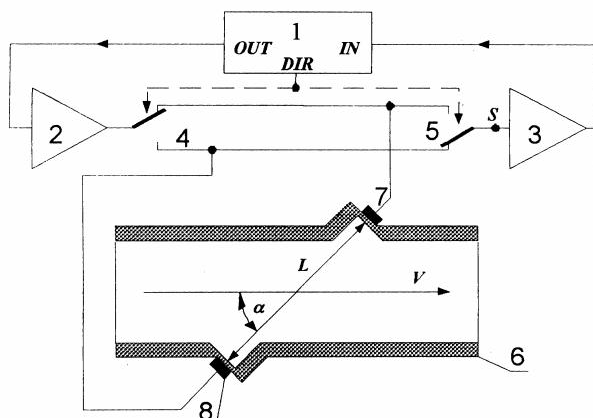
На фігурі 2 наведено приклад імпульсної діаграми роботи витратоміру, який реалізує спосіб вимірювання швидкості рідини або газу у відповідності з даним винаходом. Наведено сигнали, які існують на сигнальному виході OUT, на виході напрямку випромінювання DIR, на вході S підсилювача-перетворювача 3 сигналу, що приймається, і на вході IN цифрового управляючого пристрою 1. Імпульсна діаграма поділена на чотири фази: I - випромінювання навпроти течії та отримання прямого сигналу; II - тримання першого відбитого сигналу після випромінювання проти течії; III - випромінювання у напрямку течії та отримання прямого сигналу; IV - отримання першого відбитого сигналу після випромінювання у напрямку течії.

Таким чином можна стверджувати, що можна отримати істотне підвищення точності вимірю-

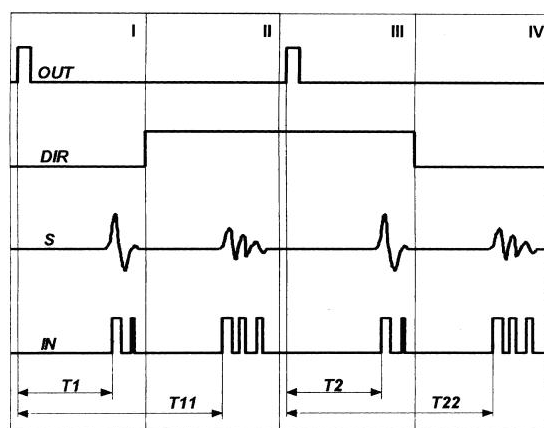
вань швидкості рідини або газу, тому що згідно з запропонованим способом отримується результат повністю вільний від похибок, що спричинені власними затримками випромінювача, приймача і часом розповсюдження акустичного сигналу у корпусах п'єзоелектричних елементів та їх змінами у часі і з температурою.

#### Література

1. Измерения в промышленности / Под редакцией П. Профоса. М.: Металлургия. 1980. С. 355...357.
2. Фаес Ив (Faes Ives), Каль Карно (Qual Camot). Способ и установка для измерения расхода жидкости при помощи ультразвука // Заявка на получение патента ЕПВ № 0162987 от 4 декабря 1984г.
3. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2-х т. - М.: Мир, 1983.- Т.1, с. 234 - 235.



Фіг. 1



Фіг. 2

Тираж 50 екз.

Відкрите акціонерне товариство «Патент»  
Україна, 88000, м. Ужгород, вул. Гагаріна, 101  
(03122) 3 – 72 – 89 (03122) 2 – 57 – 03