

УДК 681.2:621.3.082.1

ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ МЕТОД ВИМІРУ ЩІЛЬНОСТІ РІДИН, ГАЗІВ ТА ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ

*Тараненко Ю.К., Дніпропетровський університет економіки і права,
м. Дніпропетровськ, Україна*

У роботі розглянуто диференційний метод виміру щільності рідин, газів та дисперсних систем, оснований на перетворення вимірювальної величини у різницю частот коливань механічних резонаторів, що контактують із вимірювальним середовищем

Аналіз рівня розробки віброчастотних методів автоматичного контролю щільності та постановка задачі дослідження

Граничною межею досягнення точності вимірів є точність відтворення еталонних величин. Тому, якщо порівняти точність відтворення еталонів аналогових величин сили струму $(4 \div 6) \cdot 10^{-4} \%$ та опору $1 \cdot 10^{-4} \%$ з точністю відтворення частоти коливань $5 \cdot 10^{-9} \%$ [1], можна зробити висновок, що гранично досяжна точність частотних вимірювальних систем значно вище за точність аналогових вимірювальних систем.

Частотна форма вихідного сигналу вимірювального перетворювача забезпечує передачу вимірювальної інформації до місця її централізованої обробки з мінімальними не зворотними втратами. Використання атестованої звукової карти персонального комп'ютера у якості аналого-цифрового перетворювача сигналів частотних датчиків відкриває додаткові можливості по обробці вимірювальної інформації від частотних датчиків. Основним елементом частотних датчиків, або первинних вимірювальних перетворювачів є частотноне-залежний коливальний контур з параметрами, залежними від вимірювальної величини. Розрізняють частотні датчики з електричними та механічними коливальними контурами.

Основним параметром, якій визначає точність перетворення вимірювальної величини у частоту коливань є добротність коливального контуру, яка визначає втрати коливальної енергії за період. Добротність механічних коливальних систем значно вища за добротність електричних коливальних контурів [2], тому первинні вимірювальні перетворювачі на основі електромеханічних коливальних контурів є найбільш перспективними.

Основним чутливим елементом електромеханічного коливального контуру є резонатор. Серед резонаторів, які застосовуються у технологічних вимірюваннях особливе місце займають резонатори камертонного типу, добротність яких може досягати десятків тисяч.

Автором статті зроблено біля 80 винаходів у галузі віброчастотних вимірювань технологічних параметрів таких, як рівень рідких та сипучих середовищ у технологічних апаратах [3], тиск та зусилля [4], температура [5], в'язкість та щільність рідин, масова концентрація дисперсних систем [6].

Для вирішення задач енергозбереження точні виміри щільності газу, нафти та нафтопродуктів мають особливе значення, тому що, наприклад, масові витрати, нафтопродуктів визначають як результат перемноження щільності на їх об'ємні витрати. Відомо, що підвищення точності вимірювання кількості газу тільки на кордоні Росія - Україна всього лише на 0,1 % може заощадити Україні щорічно понад 10 млн. доларів США.

Світовим лідером щодо розробки та виробництва віброчастотних вимірювачів щільності рідин є фірма Solartron (Велика Британія) [7]. За досягненнями цієї фірми можна зробити обґрунтований висновок щодо світового рівня віброчастотних методів виміру щільності узагалі. Так віброчастотні вимірювачі щільності з трубчастими резонаторами моделей 7830 та 7840 мають додаткову похибку від зміни температури $1,2 \text{ кг/м}^3$ на 1°C , та від зміни тиску вимірювальної рідини, а відповідно і швидкості її течії через резонатор $5 \div 15 \text{ кг/м}^3$ на 1 МПа, що для задач обліку енергоносіїв є не бажаним. Хоча у вимірювачах щільності рідини і використовується датчики температури та тиску рідини і сучасний мікропроцесор, унаслідок запізнення сигналів компенсації додаткову похибку не вдається знизити нижче приведенного рівня.

Виходом із становища, що склалося, може бути використання винайденого автором диференційного віброчастотного методу виміру щільності рідини на основі двох резонаторів, якій дозволяє знизити не тільки додаткову похибку від впливу температури і тиску вимірювальної рідини, але й інші адитивні складові похибки виміру, та здійснити додаткову лінеаризацію функції перетворення безпосередньо у датчику при відніманні частот коливань резонаторів [8].

Науковою новизною роботи є те, що вперше у теорії віброчастотних вимірювань щільності рідин та газів використовується диференційний метод виміру з керованим відношення частот резонаторів у завданій точці діапазону виміру, з метою здійснення повної компенсації основних складових погрішності виміру та лінеаризації функції перетворення щільності у різницю частот коливань резонаторів.

Метою даної статті є ознайомлення широкого загалу фахівців приладобудівної галузі з новим диференційним віброчастотним методом виміру щільності рідин газів та дисперсних систем на прикладі керування відношенням частот трубчастих, пластинних та циліндричних резонаторів.

Загальні засади керування частотами коливань резонаторів диференційного датчика

Завдане відношення частот коливань резонаторів диференційного датчика у певній точці діапазону виміру щільності, згідно винайденому автором способу виміру [8], забезпечує умови компенсації складових похибок виміру щільності рідини. Для компенсації не інформативного параметра [9], або забезпечення додаткових умов зменшення нелінійності функції перетворення [10, 11], відношення частот коливань резонаторів повинно відповідати певним співвідношенням.

Для компенсації складових погрішності виміру таке відношення набуває вигляду:

$$\frac{f_1(\rho_K)}{f_2(\rho_K)} = \frac{\phi_B(\rho_K)}{\phi_A(\rho_K)}. \quad (1)$$

де $\phi_A(\rho_K)$, $\phi_B(\rho_K)$ – коефіцієнти впливу не інформативного параметра на частоту коливань резонаторів;

ρ_K – величина щільності вимірювальної рідини або газу, при якій здійснюється повна компенсація впливу не інформативного параметру.

Коефіцієнти $\phi_A(\rho_K)$, $\phi_B(\rho_K)$ можна визначити теоретично або експериментально, або визначити теоретично і уточнити експериментально.

Забезпечення виконання умов (1) підбором конструктивних параметрів резонаторів диференційного датчика обмежує галузі застосування останнього, оскільки після виготовлення резонаторів датчик постає придатним тільки для визначених умов експлуатації та діапазону виміру щільності.

Автором розроблено спосіб керування величиною відношення частот резонаторів змінами зусиль N , що діють уздовж осі трубчастого резонатора, по периметру закріплення пластинного резонатора, у повздовжньому та коловому напрямку серединної поверхні циліндричного резонатора [12, 13].

Розроблений спосіб дозволяє на одній парі резонаторів забезпечити високу точність вимірів щільності рідин та газів диференційним датчиком, на різних діапазонах зміни щільності та у різних умовах експлуатації керуванням відношенням частот резонаторів.

Загальні засади керування частотами коливань резонаторів диференційного датчика полягають у наступному:

- вузол зміни частоти коливань резонатора керує його жорсткістю та знаходиться у центрі мас коливальної системи резонатора;
- підвищується частота резонатора з більшою чутливістю до вимірювальної щільності рідини, а зменшується частота резонатора з меншою чутливістю до щільності;
- бажано керувати частотою тільки одного резонатора;
- зусилля, що генеруються вузлом зміни частоти коливань повинні бути стабільними у часі та інваріантними до параметрів навколишнього середовища.

Керування величиною відношення частот коливань трубчастих резонаторів у завданій точці діапазону виміру щільності

Трубчасті резонатора проточного типу є найбільш розповсюдженими у віброчастотних вимірювачах щільності унаслідок нечутливості до в'язкості вимірювальної рідини.

Скористаємося відомими співвідношеннями для частот коливань трубчастих резонаторів проточного типу [14].

Співвідношення для керування частотою коливань резонатора диференційного датчика при застосуванні стискаючих зусиль матиме вид:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 + c_1 \cdot \frac{L_1^2}{E_A \cdot J_A} \cdot N_{KA}}; f_2 = f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \\ f_D &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 + c_1 \cdot \frac{L_1^2}{E_A \cdot J_A} \cdot N_{KA}} - f_{02} \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Співвідношення для керування частотою коливань резонатора диференційного датчика, при застосуванні зусиль, що розтягують резонатор, матиме вид:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}}; f_2 = f_{02} \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 - c_2 \cdot \frac{L_2^2}{E_B \cdot J_B} \cdot N_{KB}} \\ f_D &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} - f_{02} \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 - c_2 \cdot \frac{L_2^2}{E_B \cdot J_B} \cdot N_{KB}} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де f_D – вихідний частотний сигнал диференційного датчика;

N_{KA} – розтягуючі зусилля, що діють з боку вузла зміни жорсткості резонатора;

N_{KB} – стискаючі зусилля, що діють з боку вузла зміни жорсткості резонатора;

f_{01}, f_{02} – частоти коливань порожніх резонаторів;

c_1, c_2 – постійні величини які залежать від форми коливань та умов закріплення резонаторів, наприклад для жорсткого закріплення кінців та першої форми коливань $c_1 = c_2 = 2,458 \cdot 10^{-2}$;

J_A, J_B – статичні моменти інерції розчину трубки резонаторів відносно осі коливань;

E_A, E_B – модулі пружності матеріалів резонаторів;

L_1, L_2 – довжини резонаторів;

A, B – сталі для градування резонаторів, які розраховують теоретично при проектуванні та уточнюються експериментально після виготовлення резонаторів.

Для визначення необхідних зусиль N_{KA} та N_{KB} , що забезпечують компенсацію впливу не інформативних параметрів, послідовно підставимо системи рівнянь (2) та (3) у співвідношення (1), отримаємо:

$$N_{KA} = \left[\frac{\phi_B(\rho_K)}{\phi_A(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{E_A \cdot J_A}{c_1 \cdot L_1^2} \cdot \frac{f_{02}^2}{f_{01}^2} \cdot \frac{B}{A} \cdot \frac{A + \rho_K}{B + \rho_K} - \frac{E_A \cdot J_A}{c_1 \cdot L_1^2} \quad (4)$$

$$N_{KB} = \frac{E_B \cdot J_B}{c_2 \cdot L_2^2} - \left[\frac{\phi_A(\rho_K)}{\phi_B(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{E_B \cdot J_B}{c_2 \cdot L_2^2} \cdot \frac{f_{01}^2}{f_{02}^2} \cdot \frac{A}{B} \cdot \frac{B + \rho_K}{A + \rho_K} \quad (5)$$

Методика експериментального забезпечення завданого відношення частот резонаторів диференційного датчика

Із співвідношення (4) або (5) за експериментально уточненими параметрами резонаторів A, B , f_{01}, f_{02} розраховують необхідні зусилля, для того, щоб оцінити можливості їх забезпечення вузлом зміни жорсткості та не зруйнувати резонатори.

Слід зазначити, що вузол зміни жорсткості змінює частоти саме порожніх резонаторів f_{01}, f_{02} , які визначаються експериментально та можуть бути оцінені теоретично за співвідношеннями:

$$\begin{aligned} f_{01}'' &= f_{01} \cdot \sqrt{1 + c_1 \cdot \frac{L_1^2}{E_A \cdot J_A} \cdot N_{KA}} \\ f_{02}'' &= f_{02} \cdot \sqrt{1 - c_2 \cdot \frac{L_2^2}{E_B \cdot J_B} \cdot N_{KB}} \end{aligned}$$

де f_{01}'', f_{02}'' – змінені вузлом зміни жорсткості частоти коливань порожніх резонаторів.

Змінюючи f_{01}'' або f_{02}'' шляхом використання п'єзоелектрика або пропорційного цифрового перетворювача сили, забезпечують виконання одного із наступних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\phi_B(\rho_K)}{\phi_A(\rho_K)} &= \frac{f_{01}''}{f_{02}''} \cdot \sqrt{\frac{A}{B} \cdot \frac{B + \rho_K}{A + \rho_K}} \\ \frac{\phi_B(\rho_K)}{\phi_A(\rho_K)} &= \frac{f_{01}}{f_{02}} \cdot \sqrt{\frac{A}{B} \cdot \frac{B + \rho_K}{A + \rho_K}} \end{aligned}$$

Керування величиною відношення частот коливань пластинних резонаторів диференційного датчика у завданій точці діапазону виміру щільності

Використання пластинних резонаторів заглибного типу у віброчастотних вимірювачах щільності рідини робить останні мобільними тому, що не потребує спеціальних обвідних трубопроводів. Розташовані у спеціальному корпусі резонатори заглиблюються у технологічний апарат або трубопровід великого діаметру за допомогою штанг.

Скористаємося відомими співвідношеннями для частот коливань пластинних резонаторів [14].

Співвідношення для керування частотою коливань резонатора диференційного датчика при застосуванні стискаючих зусиль матимуть наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 + c_1 \cdot \frac{a_1^2}{G_A} \cdot N_{KA}}; f_2 = f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \\ f_D &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 + c_1 \cdot \frac{a_1^2}{G_A} \cdot N_{KA}} - f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \end{aligned} \right\}; \quad (10)$$

Співвідношення для керування частотою коливань резонатора диференційного датчика, при застосуванні зусиль, що розтягують резонатор, матиме вид:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}}; f_2 = f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 - c_2 \cdot \frac{a_2^2}{G_B} \cdot N_{KB}} \\ f_D &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} - f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 - c_2 \cdot \frac{a_2^2}{G_B} \cdot N_{KB}} \end{aligned} \right\}; \quad (11)$$

де G_A, G_B – циліндричні жорсткості пластин резонаторів;

a_1, a_2 – радіуси круглих пластин резонаторів;

c_1, c_2 – параметри резонаторів, що залежать від умов закріплення та форми коливань, наприклад для першої форми при закріпленню по периметру пластини $c_1 = c_2 = 6,64 \cdot 10^{-2}$.

Для визначення необхідних зусиль N_{KA} та N_{KB} послідовно підставимо системи рівнянь (10) та (11) у співвідношення (1), тоді отримаємо:

$$N_{KA} = \left[\frac{\Phi_B(\rho_K)}{\Phi_A(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{G_A}{c_1 \cdot a_1^2} \cdot \frac{f_{02}^2}{f_{01}^2} \cdot \frac{B}{A} \cdot \frac{A + \rho_K}{B + \rho_K} - \frac{G_A}{c_1 \cdot a_1^2} \quad (12)$$

$$N_{KB} = \frac{G_B}{c_2 \cdot a_2^2} - \left[\frac{\Phi_A(\rho_K)}{\Phi_B(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{G_B}{c_2 \cdot a_2^2} \cdot \frac{f_{01}^2}{f_{02}^2} \cdot \frac{A}{B} \cdot \frac{B + \rho_K}{A + \rho_K} \quad (13)$$

Після розрахунку зусиль за співвідношеннями (12), (13) та їх оцінки встановлення необхідного відношення частот коливань резонаторів здійснюється експериментально за розглянутою вище методикою.

Теоретично оцінити частоти порожніх резонаторів можна з наступних співвідношень:

$$\begin{aligned} f_{01}'' &= f_{01} \cdot \sqrt{1 + c_1 \cdot \frac{a_1^2}{G_A} \cdot N_{KA}} \\ f_{02}'' &= f_{02} \cdot \sqrt{1 - c_2 \cdot \frac{a_2^2}{G_B} \cdot N_{KB}} \end{aligned}$$

Керування величиною відношення частот коливань циліндричних резонаторів диференційного датчика щільності рідини у заданій точці

діапазону виміру щільності

Циліндричні резонатори застосовуються переважно у вимірювачах щільності газів. Від трубчастих та пластинних їх відрізняє висока чутливість до вимірювальної щільності та технологічність виготовлення.

Системи порушення автоколивань циліндричних резонаторів значно складніші. Незважаючи на це, віброчастотні вимірювачі щільності рідин на основі циліндричних резонаторів мають важливе значення при конструюванні аналітичних приладів.

Для циліндричних резонаторів диференційного датчика колові зусилля N_S^1, N_S^2 у двічі більше за повздовжні зусилля N_Z^1, N_Z^2 згідно співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} N_S^1 &= 2 \cdot N_Z^1 = 2 \cdot N_{KA}, \\ N_S^2 &= 2 N_Z^2 = 2 \cdot N_{KB} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Скористаємося відомими співвідношеннями для перших основних частот коливань циліндричних резонаторів [14] з урахуванням системи (14)..

Співвідношення для керування частотою коливань резонатора диференційного датчика при застосуванні стискаючих зусиль матиме вид:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 + \frac{2,73 \cdot L_1^2}{\pi^2 \cdot \lambda_1^2 \cdot E_A \cdot h_1^3} \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_1^2}{a_1^2} \right) \cdot N_{KA}}; f_2 = f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \\ f_D &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 + \frac{2,73 \cdot L_1^2}{\pi^2 \cdot \lambda_1^2 \cdot E_A \cdot h_1^3} \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_1^2}{a_1^2} \right) \cdot N_{KA}} - f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Співвідношення для керування частотою коливань резонатора диференційного датчика, при застосуванні зусиль, що розтягують резонатор, матимуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}}; f_2 = f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 - \frac{2,73 \cdot L_2^2}{\pi^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot E_B \cdot h_2^3} \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_2^2}{a_2^2} \right) \cdot N_{KB}} \\ f_D &= f_{01} \cdot \sqrt{\frac{A}{A + \rho_K}} - f_{02} \cdot \sqrt{\frac{B}{B + \rho_K}} \cdot \sqrt{1 - \frac{2,73 \cdot L_2^2}{\pi^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot E_B \cdot h_2^3} \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_2^2}{a_2^2} \right) \cdot N_{KB}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

де a_1, a_2 – радіуси серединної поверхні циліндрів;

h_1, h_2 – товщина стінок циліндрів;

λ_1, λ_2 – параметри, які залежать від умов закріплення циліндрів.

Для визначення необхідних зусиль N_{KA} та N_{KB} послідовно підставимо системи рівнянь (15) та (16) у співвідношення (1), тоді отримаємо:

$$N_{KA} = \left[\frac{\phi_B(\rho_K)}{\phi_A(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot \lambda_1^2 \cdot E_A \cdot h_1^3}{2,73 \cdot L_1^2 \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_1^2}{a_1^2} \right)} \cdot \frac{f_{02}^2}{f_{01}^2} \cdot \frac{B}{A} \cdot \frac{A + \rho_K}{B + \rho_K} - \frac{\pi^2 \cdot \lambda_1^2 \cdot E_A \cdot h_1^3}{2,73 \cdot L_1^2 \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_1^2}{a_1^2} \right)} \quad (17)$$

$$N_{KB} = \frac{\pi^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot E_B \cdot h_2^3}{2,73 \cdot L_2^2 \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_2^2}{a_2^2} \right)} - \left[\frac{\phi_A(\rho_K)}{\phi_B(\rho_K)} \right]^2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot E_B \cdot h_2^3}{2,73 \cdot L_2^2 \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_2^2}{a_2^2} \right)} \cdot \frac{f_{01}^2}{f_{02}^2} \cdot \frac{A}{B} \cdot \frac{B + \rho_K}{A + \rho_K} \quad (18)$$

Після розрахунку зусиль по співвідношенням (17), (18) та їх оцінки експериментально за розглянутою вище методикою здійснюється встановлення необхідного відношення частот коливань резонаторів.

Теоретично оцінити частоти порожніх резонаторів можна за наступними співвідношеннями:

$$f_1 = f_{01} \cdot \sqrt{1 + \frac{2,73 \cdot L_1^2}{\pi^2 \cdot \lambda_1^2 \cdot E_A \cdot h_1^3} \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_1^2}{a_1^2} \right) \cdot N_{KA}}$$

$$f_2 = f_{02} \cdot \sqrt{1 - \frac{2,73 \cdot L_2^2}{\pi^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot E_B \cdot h_2^3} \cdot \left(\pi^2 + 8 \cdot \frac{L_2^2}{a_2^2} \right) \cdot N_{KB}}$$

Висновки

Розглянуто диференційний метод виміру щільності рідин газів та концентрації дисперсних систем, який дозволяє шляхом керування відношенням частот резонаторів забезпечити повну компенсацію не інформативних параметрів у завданій точці діапазону виміру щільності.

Приведена методика експериментального визначення умов компенсації не інформативних параметрів. Розглянуті умови забезпечення завданого відношення частот коливань для трубчастих проточного типу, пластинних заглибного типу і циліндричних резонаторів, тобто усіх типів резонаторів, котрі використовуються у віброчастотних вимірювачах щільності;

Отримані результати можуть бути у подальшому використані при проектуванні віброчастотних вимірювачів щільності рідин, газів та дисперсних систем з поліпшеними метрологічними характеристиками.

Література

1. Эткин Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 408 с.
2. Новицкий П.В., Кнорринг В.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками. - Л.: Энергия, 1970. – 423 с.
3. Тараненко Ю.К. и др. Вибрационные уровнемеры // Измерение, контроль, автоматизация. ЦНИИТЭИприборостроения. – 1981. - Вып 6(40). - С.20-26.
4. Тараненко Ю.К. и др. Виброчастотный датчик с асимметричным возбуждением резонатора // Измерительная техника. - 1986. - № 8. - С.37-39.

5. Тараненко Ю.К. и др. Вибрационные термометры // Измерение, контроль, автоматизация ЦНИИТЭИ приборостроения. – 1983. – Вып. 3(47). – С.25-31.
6. Тараненко Ю.К. Погрешности измерения вибрационных плотномеров жидкости // Метрология. - 1983. - № 1. - С.40-46.
7. Жуков Ю.П. Вибрационные плотмеры. — М.: Энергоатомиздат, 1991. - 144 с.
8. А.с. №1291867 СССР. Способ дифференциального измерения плотности / Тараненко Ю.К. Опубл. 1987. Бюл. № 7.
9. А.с. №1226159 СССР. Дифференциальный вибрационный плотномер / Тараненко Ю.К. Опубл. 1986. Бюл. № 15.
10. А.с. №1187014 СССР. Дифференциальный вибрационный плотномер / Тараненко Ю.К. Опубл. 1985. Бюл. № 39.
11. А.с. №1332189 СССР. Дифференциальный вибрационный плотномер / Тараненко Ю.К. и др. Опубл. 1987. Бюл. № 31.
12. Тараненко Ю.К. и др. Вибрационно-частотный плотномер компенсационного типа. – Вопросы химии и химической технологии. Вып.73, 1983. - С.99-103
13. А.с. № 744277 СССР Частотный датчик плотности / Тараненко Ю.К. и др. Опубл. 1980. Бюл. №24.
14. Тараненко Ю.К. Дифференциальный вибрационный плотномер жидкости проточного типа: Диссерт. на соискание уч. степ. канд техн.наук. - М.: 1986.

Тараненко Ю.К. Дифференциальный метод измерения плотности жидкости, газов и дисперсных систем

В работе рассмотрен дифференциальный метод измерения плотности жидкости, газов и дисперсных систем, основанный на преобразовании измеряемой величины в разность частот колебаний механических резонаторов, которые контактируют с измеряемой средой

Taranenko J.K. Differential method of measurement of the liquid, gases and dispersed systems density

Differential method of measurement of liquid, gases and dispersed systems density is considered in the work. The method is based on transformation of measured parameter in a difference of mechanical resonators fluctuations, which contact with measured liquid

*Надійшла до редакції
10 червня 2006 року*