

Фазовий метод ультразвукового вимірювання концентрації розчинів.**Маєвський С.М.**

Використання фазового зсуву двох когерентних сигналів в якості опосередкованого параметру при вимірюванні фізичних величин вигідно відрізняється від використання широко вживаних амплітудних параметрів завдяки завадостійкості. Вимірювання фазових зсувів може виконуватися рядом методів, серед яких основними є метод оснований на визначення часового зсуву моментів досягнення сигналами характерних миттєвих значень, наприклад – моментів нуль-пересічень, та кореляційний метод, який передбачає використання нелінійних чотирьохполосників (фазових детекторів) для перемноження цих сигналів [1-5]. Якщо перший з названих методів може практично використовуватися лише для порівняно низькочастотних сигналів – до (0,1 - 1) МГц, то другий метод практично не має частотних обмежень.

Застосування фазових методів вимірювання фізичних величин не обмежується його визначенням в межах одного фазового циклу $0^{\circ} \leq \varphi \leq 360^{\circ}$. Ефективно використовується вимірювання кумулятивних значень $0^{\circ} \leq \theta^0 \leq N360^{\circ}$, де $N > 1$ - ціле число. Прикладом може бути прецизійне вимірювання тривалості затримки вимірювального сигналу в реальному чотириполоснику, який опосередковано може представляти шлях розповсюдження фізичного сигналу при реалізації вимірювання товщини твердого тіла чи взагалі відстані між точками випромінювання і прийому сигналу. Для визначення числа фазових циклів в значенні кумулятивного фазового зсуву сигналів достатньо використати крім вимірювання фазового зсуву $0^{\circ} \leq \varphi^0 \leq 360^{\circ}$ на частоті сигналу f виконати вимірювання фазового зсуву γ^0 на дещо зміненій частоті, наприклад - $(f + \Delta f)$, де зміна частоти Δf визначається з умови приросту фазового зсуву γ^0 відносно φ^0 на величину меншу за 360° . Тоді відповідно виміряним фазовим зсувам φ та γ значенню N відповідає найближче ціле число згідно наступному виразу [6]:

$$N = \left\lceil \frac{\{\gamma^0 - 180^{\circ} [\text{sgn}(\gamma^0 - \varphi^0) - 1]\} f - \varphi^0 (f + \Delta f)}{360^{\circ} \Delta f} \right\rceil \quad (1)$$

При цьому тривалість затримки сигналу становитиме

$$\tau = \frac{N360^{\circ} + \varphi^0}{360^{\circ} f} \quad (2)$$

При умові високої точності визначення частоти сигналу, що не представляє проблеми, отримання високої точності визначення тривалості затримки τ реалізується навіть при відносній неточності вимірювання фазового зсуву φ^0 , якщо $N \gg 1$. Наприклад, при $N = 20$ та при похибці вимірювання фазового зсуву $\pm 0,5^{\circ}$ точність визначення тривалості затримки становить приблизно 0,007%.

Розглянутий вище метод визначення тривалості затримки коливань здатний знайти ефективно впровадження в системах лінійного вимірювання з використанням оптичних випромінювань – оптичні фазові далекоміри, електромагнітних високочастотних випромінювань – системи радіонавігації та ультразвукових коливань – акустичні системи вимірювання відносно малих відстаней. Інтенсивність оптичних та електромагнітних сигналів далекомірів модулюють гармонійними радіочастотними сигналами і вимірюють значення їх кумулятивного фазового зсуву визначаючи таким чином часову затримку, яка при відомій фазовій швидкості та завдяки великій різниці між частотою модуляції, наприклад 100 МГц, і оптичною частотою відповідає фактичній тривалості затримки сигналу на довжині шляху розповсюдження використаного оптичного випромінювання.

Подібне прецизійне вимірювання тривалості затримки сигналів дозволяє вирішити проблему високоточного визначення фазової швидкості розповсюдження різних за природою фізичних коливань в середовищах незалежно від їх агрегатного стану. Особливого значення має висока точність вимірювання швидкості розповсюдження акустичних коливань, як опосередкованого параметру для визначення степені «втоми» конструкційних матеріалі [5,6], концентрації розчинів.

На рис.1 показана схема вимірювання швидкості ультразвукових коливань в рідині, наприклад – молоці, жирність якого необхідно визначити. П'єзоелектричний перетворювач малого діаметру 1 з широкою діаграмою направленості використовується для збудження коливань заданої фіксованої частоти ω під дією радіоімпульсного електричного сигналу, а прийом коливань здійснюється співвісним дисковим п'єзоелектричним перетворювачем 2 та перетворювачем 3, розміщеним відносно перетворювача 2 на відстані B під кутом 90° до напрямку від перетворювача 2 до перетворювача 1.

При такому розміщенні перетворювачів 2 і 3, які приймають коливання збуджені перетворювачем 1, ультразвук надходить до них різними шляхами. Якщо відстань між збудником коливань – перетворювачем 1 і приймачем цих коливань – перетворювачем 2 становить L_{12} , то відстань від збудника коливань до перетворювача 3 становить $L_{13} = \sqrt{L_{12}^2 + B^2}$. Визначивши за описаною вище методикою час затримки коливань, які надходять до перетворювачів 2 і 3 – відповідно $\tau_1 = (N_1 360^\circ + \varphi^0) / 360^\circ f$ і $\tau_2 = (N_2 360^\circ + \gamma^0) / 360^\circ f$, та враховуючи, що швидкість розповсюдження коливань в контрольованому середовищі не залежить від напрямку, можемо скласти рівняння для визначення довжини шляху L_{12} :

$$L_{12} = \frac{\tau_1 B}{\sqrt{\tau_2^2 - \tau_1^2}} \quad (3)$$

Тоді значенню швидкості ультразвукових коливань має відповідати наступне рівняння:

$$C = \frac{B}{\sqrt{\tau_2^2 - \tau_1^2}} \quad (4)$$

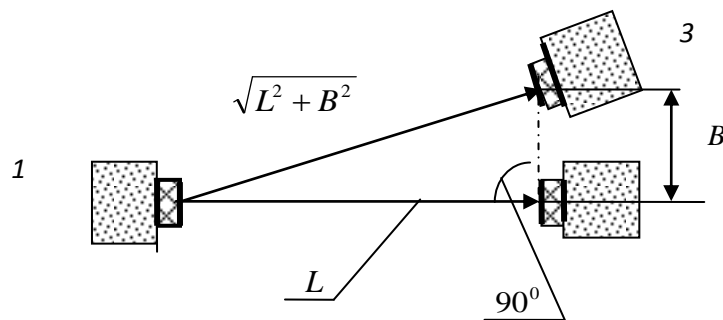


Рис.1. Вимірювання фазової швидкості ультразвукових коливань в рідких продуктах.

Частота ультразвукових коливань повинна бути достатньо високою виходячи з умови максимальної чутливості до параметру контролю. При вимірюванні рівня жирності молока достатню чутливість до концентрації крапель жиру у вигляді кульок діаметром приблизно (50 – 100) мкм отримаємо при виборі частоти коливань на рівні 1 МГц.

Для виключення впливу реверберацій ультразвуку на результат вимірювання тривалість радіоімпульсу збудженого коливання обмежується часом затримки луносигналу відбитого від приймача коливань. При виборі довжини відстані між збудником і приймачем коливань рівної 30 мм та враховуючи приблизне значення швидкості ультразвуку у молоці $C = 1,5 \cdot 10^6$ мм/с тривалість такого радіоімпульсу може дорівнювати 40 мкс, що для вибраної частоти, наприклад – 1 МГц, становить 40 періодів коливань. Враховуючи достатньо низьку добротність еквівалентного резонансного контуру п'єзоелектричного перетворювача, на який впливає присадна маса у вигляді поглинача коливань у зворотному напрямі та маса досліджуваного середовища, перехідні процеси встановлення коливань радіоімпульсу закінчуються достатньо швидко (за тривалість 10 періодів), що практично не заважає можливості вимірювання фазового зсуву. Збудження такого п'єзоелектричного перетворювача виконується в режимі нав'язаних коливань подачею на його обкладинки радіоімпульсного сигналу.

Точність встановлення відстані B (Рис.1) безпосередньо впливає на точність визначення ультразвукової швидкості. При виборі для даного прикладу $B=10$ мм можемо розраховувати на точність її встановлення на рівні ± 1 мкм, що відповідатиме похибці визначення тривалості затримки та ультразвукової швидкості $\pm 0,01\%$. При цьому збудник коливань (п'єзоелектричний перетворювач 1) повинен мати широкий кут (приблизно 20°) розкриття основної пелюстки діаграми направленості. Діаметр такого перетворювача d можемо визначити відповідно [7], як

$$d = 2 \frac{0,55\lambda}{\sin 20^\circ} \approx 3 \text{ мм}$$

Вимірювання фазового зсуву сигналу радіоімпульсу $u_{PI}(t) = U_{PI} \cos(\omega t + \psi)$,
 $\tau_{затр.} \leq t \leq \tau_{затр.} + \tau_{PI}$ (тут $\tau_{затр.}$ - час затримки радіо імпульсного сигналу при його

проходженні відстані між збудником і приймачем коливань) відносно безперервного сигналу задаючого генератору $u_G(t) = U_G \cos \omega t$, як сигналу з опорною (нульовою) початковою фазою, можемо виконати двома способами. Один з них передбачає використання схеми так званого оптимального прийому [8] на основі двох фазових детекторів з підключенням на їх другі входи сигналів генератору з квадратурним фазовим зсувом. Значенню вимірюваного фазового зсуву відповідатиме значення функції $arctg$ відношення вихідних напруг цих фазових детекторів:

$$\psi = arctg \left[\frac{(1/T) \int_0^T U_{PI} \cos(\omega t + \psi) \cdot U_G \sin \omega t \cdot dt}{(1/T) \int_0^T U_{PI} \cos(\omega t + \psi) \cdot U_G \cos \omega t \cdot dt} \right] \quad (5)$$

Певним недоліком такого вирішення схеми вимірювання є низька точність за рахунок похибок збільшеного числа вимірювальних перетворень, таких як перемноження аналогових сигналів в фазових детекторах, вимірювання їх вихідних напруг шляхом кодування з допомогою АЦП, визначення значень фазових зсувів шляхом використання функції $arctg$ від результату ділення отриманих кодованих значень напруг детекторів. Тому перевагу віддаємо другому способу, який передбачає можливість опосередкованого визначення фазових зсувів шляхом вимірювання часової затримки сигналів.

Такий альтернативний спосіб передбачає періодичне повторення збудження радіоімпульсних коливань і використання стробоскопічного перетворення частоти несучого коливання радіоімпульсів для переносу значення фазового зсуву цих коливань на фіксовану низьку частоту безперервних коливань. Приблизне значення частоти стробування високочастотного сигналу (1 МГц) може бути 10 кГц, в той час коли частота вихідних напруг стробоскопічного перетворювача повинна бути значно нижчою за частоту стробування, наприклад – 1 кГц.

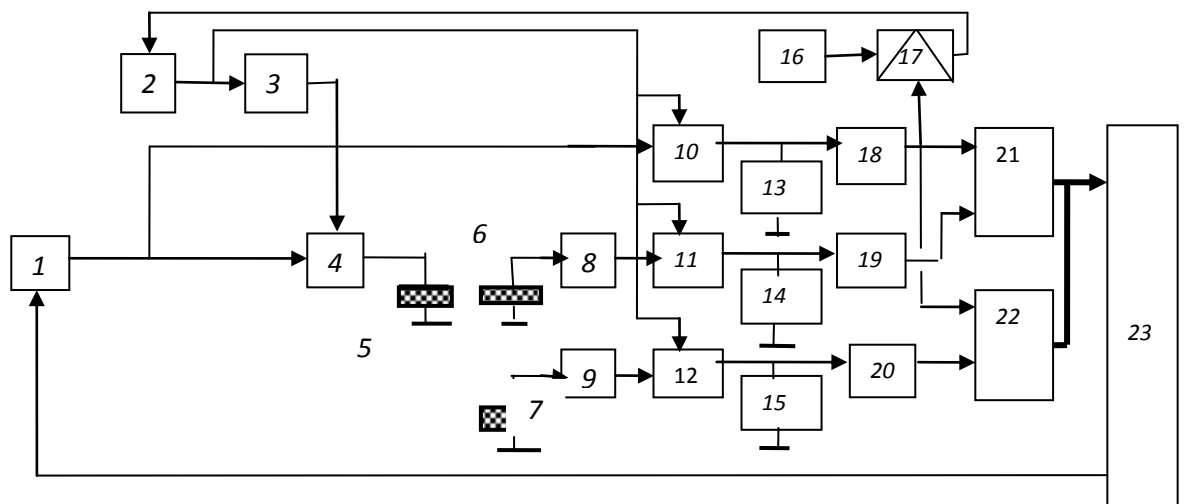


Рис.2. Функціональна схема системи визначення ультразвукової швидкості на основі стробоскопічного перетворення частоти несучих коливань радіоімпульсів.

В наведеній на рис.2 спрощеній функціональній схемі системи високочастотний безперервний сигнал вибраної частоти 1 МГц генератора 1 перетворюється в

послідовність періодичних радіоімпульсів з допомогою ключа 4, який відкривається періодичними імпульсами частоти приблизно 10 кГц з виходу одновібратора 3 керованого сигналами імпульсного генератора 2 – генератора сигналів частоти стробування системи перетворення частоти. Відтворені таким чином радіоімпульсі сигнали подаються на обкладинки п'єзоелектричного перетворювача 5 – збудника коливань.

Вихідні сигнали приймачів коливань 6,7 підсилюються підсилювачами 8,9 і, як і сигнал генератора 1, подаються на входи каналів стробоскопічного перетворювача частоти – електронні ключі 10,11,12. Вибірки високочастотного сигналу генератору 1 та сигналів несучих коливань радіоімпульсних сигналів на виходах приймачів 6 і 7 запам'ятовуються на час тривалості періодів стробування конденсаторами малої ємності 13,14,15 на входах електронних схем з високим значенням вхідного опору - повторювачів 18,19,20 з фільтрами нижніх частот на їх виходах. Результатом таких дій є формування безперервних гармонійних сигналів зі значенням початкових фаз відповідно сигналу генератору 1 та сигналів, які приймаються п'єзоелектричними перетворювачами 6,7. Вимірювання значень фазових зсувів цих сигналів виконується тригерними цифровими фазометрами 21,22.

Частота стробування автоматично регулюється для забезпечення сталої частоти вихідних сигналів стробоскопічного перетворювача частоти. Для цього використовується стабільний генератор 16 частоти $F=1$ кГц та фазовий детектор 17, вихідною напругою якого виконується регулювання частоти імпульсного генератору 2. Співвідношення між частотою $f = 1$ МГц сигналу генератору 1, частоти стробування f_{cmp} генератору 2 та частотою вихідних сигналів перетворювача частоти $F=1$ кГц визначається рівнянням: $f_{cmp} = (f - F)/k$, де k – ціле число. При даних значеннях частот f і F та $k = 100$ частота сигналу генератору 2 – частота стробування, становитиме 9,99 кГц.

При точності системи вимірювання ультразвукової швидкості на рівні 0,01% роздільна здатність визначення концентрації розчинених у рідині речовин та дисперсних суспензій не гірше 10^{-3} .

1. М.Т.Бова, В.О.Гойжевський, С.М.Маєвський, В.В.Молебний. Вимірювання різниці фаз у радіоелектроніці. «Вища школа» Київ. 1972.
2. А.С.Глинченко, С.С.Кузнецкий, А.М.Фиштейн, М.К.Чмых. Цифровые методы измерения сдвига фаз. «Наука» Новосибирск. 1979.
3. Е.С.Полищук. Измерительные преобразователи. «Вища школа» Киев. 1981.
4. A.S.Birks, R.E.Green, P.McIntire/ Nondestructive Testing Handbook. Second Edition. Vol. 7 Ultrasonic Testing USA 1991.
5. С.М.Маєвський. Прецизійне вимірювання швидкості ультразвукових коливань як метод оцінки напружень та втоми конструкційних матеріалів. Ж-л. «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» №2 2015 ст. 26 – 29.
6. И.Н.Ермолов, Н.П.Алешин, А.И.Потапов. Неразрушающий контроль. Книга 2. Акустические методы контроля. «Высшая школа»М. 1991.
7. И.Н.Ермолов. Контроль ультразвуком (краткий справочник). «ЦНИИТМАШ»М.1992.
8. В.Б.Пестряков. Фазовые Радио-технические системы «Сов.радио» М.1968.

