

УДК 681. 330. 888

Забезпеченням інваріантності ультразвукового інтерференційного рівнеміра на стоячій хвилі в системі нормалізації молока в ємностях

О.Й. Рішан, канд. техн. наук

Ю.М. Бородкіна, магістрант



Постановка проблеми. Масова доля жиру у молоці – основний параметр, який визначає його склад та харчову цінність. Концентрацію жиру в молоці враховують при оплаті як за сировину (незбиране молоко), так і особливо за якість кінцевої продукцію при її реалізації – нормалізоване молоко, жирність якого необхідно підтримувати з похибкою не більше $\pm 0,06\%$. Тому державним стандартом на молоко та технологічними інструкціями передбачається постійний контроль цього параметру. Для забезпечення випуску нормалізованого молока заданої якості по вмісту жиру при одночасній економії вершків, доцільно виконувати нормалізацію молока в ємності з використанням ультразвукового інтерференційного рівнеміра на стоячій хвилі, який забезпечував би високу роздільну здатність вимірювання рівня в повітрі. При цьому попередньо знежирене молоко та отримані при цьому вершки, які знаходяться у окремих ємностях, надходять почергово у ємність нормалізації (рис.1). При відомому (сталому) поперечному перерізі ємності нормалізації, необхідна жирність молока на фасування

забезпечується тільки необхідним рівнем знежиреного молока, та відповідним йому рівнем добавлених вершків. Таким чином висока точність вимірювання об'ємної концентрації вершків у цьому випадку забезпечується одним приладом – рівнеміром з високою дозвільною здатністю, що контролює заповнення обох компонент до заданого рівня [1].

Одною із особливостей ультразвукового інтерференційного рівнеміра на стоячій хвилі є не ізольованість від навколишнього середовища акустичної зони вимірювання і, відповідно, вплив навколишнього середовища на цю зону при вимірюванні відхилення рівня від номінального значення. Зона вимірювання (зона стоячої хвилі) утворюється між поверхнею молока, яка використовується в якості відбиваючої поверхні, та площиною випромінювання – приймання акустичної головки, яка вміщує випромінювач та приймач (рис. 1). Основними факторами збурення на зону вимірювання є зміна швидкості потоків повітря в цій зоні (турбулентність) та зміна його температури, які визивають додаткові похибки на результати вимірювань рівня. Вплив цих факторів пояснюється заповненням зони вимірювання неоднорідністю повітряних потоків і температури. Якщо величина неоднорідності порівняна з довжиною хвилі, то ультразвукові хвилі розсіюються на ній в усі сторони, а коли неоднорідність набагато більша довжини хвилі, випромінюваний промінь заломлюється на ній. Це призводить до зміни як інтенсивності ультразвукових коливань стоячої хвилі на приймачі, так і на зміну фази коливань на ньому, і відповідно, до виникнення додаткових похибок.

Найбільш загальна формула для середнього значення зміни квадрату логарифму амплітуди сигналу $\overline{Y^2}$ на приймачі, яка враховує турбулентність повітряного середовища зони вимірювання, дорівнює:

$$\sqrt{\overline{Y^2}} = 2,3 \frac{A * \sqrt{H^3}}{C * \sqrt[6]{K^7} * \sqrt[6]{\lambda^7}}, \quad (1)$$

де A - характеристика турбулентності [$(\sqrt[3]{m^2})/C$]; K – стала, що визначається типом середовища і його розмірами ; λ – довжина хвилі [м]; C - швидкість розповсюдження ультразвуку [м/с]; H - відстань між поверхнями випромінювання-приймання та молока [м].

Якщо врахувати, що вихідна відстань $H_{0(\text{вих.})}$ між площиною випромінювання-приймання та відбиваючою поверхнею молока, що встановлюється перед початком вимірювань, визначається за формулою [2]:

$$H_{0(\text{вих.})} = (4n - 1) (\lambda/8), \quad (2)$$

а також врахувати, що залежність між швидкістю C розповсюдження ультразвукових коливань в повітряному середовищі і відхиленням $\pm \Delta t_x$ температури цього середовища від температури 0°C має вигляд:

$$C = C_0 \pm 0,6 \Delta t_x, \quad (3)$$

то, виразивши довжину λ ультразвукової хвилі через її частоту F_B випромінювання і швидкість C , можемо отримати умовний фазовий зсув Δh_t в зоні вимірювання, який спричинений зміною температури в ній:

$$\begin{aligned} \Delta h_t &= H_{0(\text{tx})} - H_{0(\text{твих.})} = \\ &= (4n - 1) (C_0 \pm 0,6 \Delta t_x) (1/8F_B) - (4n - 1)(C_0 \pm 0,6 \Delta t_{\text{вих.}}) (1/8F_B) = \end{aligned}$$

$$= 0,075 (4n - 1) (\Delta t_{\text{хр}}/8F_{\text{В}}) \quad (4),$$

де $H_{0(\text{вих.})}$ – вихідна відстань між випромінюючою та відбиваючою поверхнями при температурі в зоні вимірювання на момент налаштування рівнеміра; $H_{0(\text{тх})}$ – вихідна відстань між випромінюючою та відбиваючою поверхнями при довільній температурі в зоні вимірювання рівнеміра в процесі експлуатації; $\pm \Delta t_{\text{хр}}$ – відхилення температури в зоні вимірювання від температури $\Delta t_{\text{вих}}$ в момент налаштування рівнеміра; $C_0 = 331,3$ м/с – швидкість ультразвуку при температурі повітря 0°C та атмосферному тиску 760 мм.рт.ст.; $0,6$ – постійна [м/(с* $^\circ\text{C}$)].

Додаткові похибки рівнеміра за формулою (1) за зміни швидкості потоків повітря (турбулентності) на кожні 10 м/с складає до $\pm 0,3$ мм, а за зміни температури за формулою (4) знаходиться в межах $\pm 0,24$ мм при відхиленні температури в зоні вимірювання від вихідного її значення на $\pm 10^\circ\text{C}$.

Мета статті – розробка функціональної схеми інтерференційного рівнеміра на стоячій хвилі, що реалізує конструктивні способи компенсації впливу неоднорідності повітряних потоків і їх температури на його зону вимірювання.

Виклад основного матеріалу. З метою зниження впливу на зону вимірювання зміни швидкості повітряних потоків, які приводять до зміни амплітуди приймача при незмінному рівні, розроблений оригінальний метод виділення цього впливу та його компенсація. Суть методу – в одночасному використуванні інформації в двох точках стоячої хвилі, які віддалені одна від одної по осі випромінювання та приймання ультразвукових коливань на чверть

довжини випромінюваної хвилі. Характерною особливістю таких точок є те, що сума квадратів тисків у цих точках є постійною. Метод компенсації реалізується в ПВП за допомогою двох приймачів, один із яких зсунутий по осі випромінювання-приймання по відношенню приймача, що знаходиться у площині випромінювача, на чверть довжини хвилі. Дійсно, якщо використати значення амплітуди тиску по осі стоячої хвилі на площину випромінювання $P(h)$ [3] та тиск в точці $P(h+\lambda/4)$, що зміщена по осі випромінювання-приймання на $\lambda/4$, то сума квадратів тисків у таких точках (з урахуванням співвідношення між тиском P , інтенсивністю I_0 вихідного випромінювання та акустичним опором ρC : $P = 2\sqrt{2 \rho C I_0}$), дорівнює:

$$\begin{aligned} P^2(h) + P^2(h+\lambda/4) &= \\ &= [2\sqrt{2 \rho C I_0} \cos(h)]^2 + [2\sqrt{2 \rho C I_0} \cos(h+\lambda/4)]^2 = \\ &= [2\sqrt{2 \rho C I_0} \cos(h)]^2 + [2\sqrt{2 \rho C I_0} \sin(h)]^2 = \\ &= 8 * \rho C * I_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Відповідно можна отримати залежність для суми квадратів амплітуд сигналів приймачів вимірювального $U(h)$ та додаткового $U(h+\lambda/4)$, що зсунутий по осі випромінювання-приймання стоячої хвилі на $\lambda/4$:

$$U^2(h) + U^2(h+\lambda/4) = 8 * \rho C * I_0 * K_{пр}, \quad (6)$$

де $K_{пр} = K_{пр(h)} = K_{пр(h+\lambda/4)}$ – загальний коефіцієнт перетворення приймачів, після їхнього нормування.

Таким чином, сума квадратів тисків в двох точках в стоячій хвилі, що віддалені одна від одної на $\lambda/4$, постійна та пропорційна інтенсивності I_0 і, відповідно, сума квадратів нормованих сигналів приймачів, що вимірюють тиск

в цих точках, не залежить від зміни відстані між площиною випромінювання приймання акустичної головки та відбиваючою поверхнею молока, що визивається зміною рівня останнього. В той же час відхилення цієї суми від вихідного значення по (6), визивається впливом тих факторів збурення, які змінюють амплітуду приймачів без зміни довжини хвилі в зоні вимірювання, і ці збурення усуваються зміною інтенсивності коливань, що випромінюються.

Для стабілізації довжини хвилі в зоні вимірювання інтерференційного рівнеміра на стоячій ультразвуковій хвилі розроблений метод, який підтримує незмінною довжину хвилі незалежно від того, який фактор впливає на її зміну. Суть методу в тому, що по різниці модулів акустичних тисків P в двох точках стоячої хвилі, які віддалені одна від одної по осі випромінювання-приймання ультразвукових коливань на половину довжини хвилі, змінюється частота випромінюваних коливань. В загальному, різниця тисків ΔP в таких точках стоячої хвилі, якщо довжина хвилі отримує від дії збурення деякий приріст $\pm\Delta\lambda$, дорівнює:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P(h+\lambda/2) + P(h) = \\ &= P \cos[(2\pi/\lambda)(h+\lambda/2)] + P \cos(2\pi h/\lambda) = \\ &= 2P \cos[(2\pi h/\lambda) + (\pi/2)(\lambda/(\lambda\pm\Delta\lambda))] * \cos[(\pi/2)(\lambda/(\lambda\pm\Delta\lambda))], \quad (7) \end{aligned}$$

де $P(h)$ - тиск в стоячій хвилі в площині випромінювання-приймання; $P(h+\lambda/2)$ – тиск в точці, що віддалена від площини випромінювання-приймання на відстань $\lambda/2$; λ - розрахункове значення довжини хвилі в зоні вимірювання для конкретних умов налаштування ПВП.

Залежність (7) показує, що, якщо $\pm\Delta\lambda$ не дорівнює нулю, то не дорівнює нулю і $\cos[(\pi/2)(\lambda/(\lambda \pm \Delta\lambda))]$ та $\Delta P \neq 0$, а зміна знаку $\cos[(\pi/2)(\lambda/(\lambda \pm \Delta\lambda))]$ дозволяє визначити в яку сторону відбувається зміна довжини хвилі в зоні вимірювання по відношенню до її значення у момент налаштування ПВП. По аналогії з (6) – різниця сигналів на приймачах теж визначається залежністю (7), але помноженій на загальний коефіцієнт $K_{пр}$ перетворення приймачів, після їхнього нормування.

При теоретичному обґрунтуванні можливості отримання різниці сигналів, що залежить від зміни довжини хвилі по залежності (7), взято суму сигналів тисків. Це пояснюється тим, що в двох точках стоячої хвилі, що віддалені по осі випромінювання-приймання на $\lambda/2$, знаки тисків вже протилежні і відповідно сигнали на приймачах знаходяться у протилежних фазах.

Функціональна схема ультразвукового інтерференційного рівнеміра, в якому забезпечується інваріантність від факторів, що впливають на зону вимірювання рівнеміра на стоячій хвилі, приведена на рис 1. Рівнемір реалізує диференціальний метод вимірювання, при якому первинний вимірювальний перетворювач (ПВП) вимірює тільки відхилення рівня від заданого номінального значення, що визначається формулою (2). Схема ПВП [2] на стоячій хвилі складається (рис.1): із акустичної головки 21, в поверхні випромінювання – приймання якої розташовані випромінювач 1 та приймач 2. Головка 21 закріплена на телескопічній трубі 23, яка за допомогою мікрометричного гвинта 24, шестерень 25, 26 і крокового двигуна 18 переміщується у вертикальній площині [3]. Весь механічний вузол

положенні, яке фіксується кінцевим вимикачем 19. Площина випромінювання – приймання головки 21 установлюється паралельно поверхні молока. Вихідна відстань від поверхні молока, що визначається залежністю (2), задається блоком 17 обробки та керування кроковим двигуном, яким одночасно реєструється кількість імпульсів на обертання крокового двигуна [2].

В процесі контролю зі зміною рівня молока змінюється відстань $H_{0(\text{вих.})}$, що призводить зміни тиску в стоячій хвилі і зміні амплітуди та фази сигналу $U(\mathbf{h})$ на виході приймачів 2 і 4 по залежності:

$$U(\mathbf{h}) = 2 K_{\text{пр}} P_{0\text{р}} |\cos(\mathbf{k} H_{\text{р}})| = U_{\text{max}} \cos[\mathbf{h} + (\mathbf{n} \lambda) / 2] = U_{\text{max}} |\cos \mathbf{h}|, \quad (8)$$

а приймача 3 по залежності:

$$U(\mathbf{h}) = U_{\text{max}} |\sin \mathbf{h}|. \quad (9)$$

При практичній реалізації методу стабілізації довжини хвилі в зоні вимірювання по залежності (7), в якості елемента порівняння використовується подвійний інтегратор 11, на один вхід якого подається опорний нульовий сигнал, а на другий вхід подається алгебраїчна різниця по залежності (7) між сигналами приймачів 2 та 4 (останній зсунутий по осі випромінювання – приймання на $\lambda/2$), які попередньо пройшли через підсилювачі-детектори 6 та 7. Якщо різниця між сигналами приймачів 2 і 4 дорівнює нулю, то довжина хвилі є незмінною. В іншому випадку сигнал з виходу подвійного інтегратора 11 змінює частоту випромінювання ультразвукових коливань в зоні вимірювання за допомогою генератора 14 регульованої ультразвукової частоти, чим підтримується незмінною довжина стоячої хвилі.

Генератор 14 являє собою класичний RC-генератор на операційному підсилювачі з фазобалансним мостом, який вміщує два активних опори та два

реактивних (ємності), а співвідношення між активними та реактивними опорами задає частоту генерації. Такий **RC**-генератор додатково обладнаний електронним регулятором зміни частоти генерування, зміна якої здійснюється за допомогою двох польових транзисторів, опори стік-витік яких ввімкнені паралельно активним опорам фазобалансного моста.

Якщо врахувати залежність (3) та перетворення при виведення залежності (4), то умова стабілізації довжини хвилі приймає вигляд:

$$|\pm\Delta F_B| \lambda = 0,6 |\pm \Delta t_{xr}|, \quad (10)$$

де $\pm\Delta F_B$ - необхідне відхилення частоти генератора, що пов'язане із стабілізацією довжини хвилі.

Відносна варіація δ_f частоти **RC**-генератора повинна відповідати тільки межовому значенню відхилення довжини хвилі, що визивається зміною температури в зоні вимірювання, тобто:

$$\delta_f = |(\pm\Delta F_B) / F_B| = (0,6 * |\pm \Delta t_{xr}| * F_B) / \lambda = |(G_m - G_0) / G_0|, \quad (11)$$

де G_m – максимальне або мінімальне значення провідності фазобалансного моста, а G_0 – середнє значення сумарної провідності цього моста.

За відомих значень максимальної провідності $G_{\max_{св}}$ між стоком та витком вибраних польових транзисторів при напрузі на затворах, що дорівнює нулю, та їх мінімальній провідності $G_{\min_{св}}$ при напрузі на затворах, що дорівнює 0,8 напруги відсікання, необхідне значення провідності G_R в плечах фазового балансного моста дорівнює:

$$G_R = [(1 - \delta_f) * G_{\max_{св}} - (1 + \delta_f) * G_{\min_{св}}] / 2\delta_f, \quad (12)$$

де враховується, що $G_0 = G_R + 0,5 (G_{\max\text{св}} + G_{\min\text{св}})$ і відповідає вихідній температурі в зоні вимірювання при налаштуванні рівнеміра.

При практичній реалізації методу усунення факторів збурення, які змінюють амплітуду приймачів без зміни довжини хвилі в зоні вимірювання, в якості елемента порівняння амплітуд випромінюваних коливань, використовується подвійний інтегратор 10, на один вхід якого подається опорний сигнал зразкової напруги 13, який умовно дорівнює одиниці. На другий вхід подається алгебраїчна сума сигналів по залежності (6) між сигналами приймачів 2 та 3 (останній зсунутий по осі випромінювання – приймання на $\lambda/4$), які попередньо пройшли через підсилювачі-детектори 5 і 6 та квадратори 8 і 9. Сигнал з виходу подвійного інтегратора 10 через блок 15 автоматичного регулювання підсилення змінює амплітуду сигналу ультразвукового генератора 14, і відповідно через підсилювач за потужністю 16 змінює амплітуду випромінювання ультразвукових коливань в зоні вимірювання, чим компенсується вплив на неї турбулентності навколишнього повітряного середовища.

Стабілізовані за амплітудою та довжиною хвилі сигнали по залежностям (8) і (9), які залежать тільки від зміни рівня молока, надходять у блок обробки сигналів приймачів 12, де здійснюється їх математична обробка і аналого-цифрове перетворення. Відхилення результуючого сигналу у цифровому коді блоку 12 порівнюється у блоці обробки 17 із заданим вихідним значенням і, при наявності відхилення із відповідним знаком, блок 17 переміщує головку 21,

підтримуючи її на відстані по залежності (2). Блок 20 здійснює індикацію результатів вимірювання.

Висновок. Розглянуті способи забезпечення інваріантності ПВП вимірювання рівня на ультразвуковій стоячій хвилі, забезпечують зниження додаткових похибок: від впливу турбулентності повітряних потоків в зоні вимірювання майже на порядок (до $\pm 0,03$ мм), а від зміни температури в зоні вимірювання – до $\pm 0,02$ мм.

ЛІТЕРАТУРА

1. Способи зниження похибки нелінійності ультразвукових інтерференційних методів контролю рівня рідин /Рішан О.Й., Христенко В.О.//Науково-технічна інформація. – 2011. - №4. – С. 54-56.
2. Спосіб ультразвукового контролю товщини виробу /Рішан О.Й., Гуманюк М.Н.//А.С.№994911, Б.В.№5, 1983.
3. Ультразвуковий пристрій вимірювання товщини стрічки / Рішан О.Й.// А.С. № 845553, 1983.
4. Ультразвуковий пристрій вимірювання товщини стрічки /Рішан О.Й., Гуманюк М.Н./А.С.№1047268, 1983.