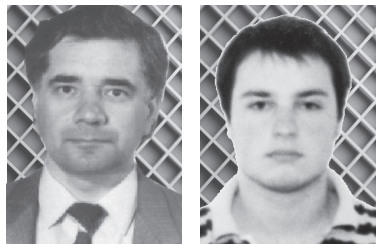


СПОСОБИ ЗНИЖЕННЯ МЕТОДИЧНОЇ ПОХИБКИ НЕЛІНІЙНОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ РІВНЯ РІДИН



О. Й. Рішан, канд. техн. наук,
В. О. Христенко

Постановка проблеми. Автоматичний контроль рівня рідин і сипких матеріалів – необхідна і важлива складова багатьох сучасних виробничих процесів. Вирішення задач сучасної науки і техніки вимагає підвищення точності вимірювань рівня рідин. У деяких випадках, наприклад при нормалізації молока в ємностях, його рівень необхідно вимірювати з відносною похибкою не більше 0,01%. При цьому доцільно використовувати рівнеміри, які мають малий поріг чутливості і побудовані на ультразвукових інтерференційних методах.

Значне зменшення порогу чутливості в разі використання ультразвукових методів для вимірювання рівня рідин у повітрі можна отримати, застосовуючи інтерференційні методи на стоячій ультразвуковій хвилі. Така хвиля утворюється в просторі між електроакустичним первинним вимірювальним перетворювачем (ПВП), що включає в себе випромінювач і приймач, і контрольованою за відстанню (рівнем) поверхнею рідини за рахунок суперпозиції прямої і зворотної хвиль при безперервному озвучуванні поверхні, положення якої контролюється [1]. Такі ПВП реагують на соті частки міліметра зміни рівня речовини від номінального його значення.

Амплітуда $U(\mathbf{h})$ і фаза сигналу на виході первинного вимірювального перетворювача, що реалізує метод на стоячій ультразвуковій хвилі, змінюється згідно з залежністю:

$$\begin{aligned} U(\mathbf{h}) &= 2 K_p P_{op} \left| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{H}_p\right) \right| = \\ &= U_0 \left| \cos\left(\mathbf{h} + \mathbf{n} \frac{2}{\lambda}\right) \right| = U_0 \left| \cos \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h} \right|, \end{aligned} \quad (1)$$

де P_{op} – амплітуда тиску в прямій і зворотній хвилях, інтерференція яких відбувається; K_p – коефіцієнт перетворення приймача (його чутливість); \mathbf{H}_p – відстань між площиною випромінювання – приймання ультразвукових хвиль електроакустичного перетворювача і відбиваючою поверхнею, рівень якої вимірюється; \mathbf{n} – ціле число півхвиль, що можуть бути розташовані на відстані \mathbf{H}_p ; \mathbf{h} – зміна відстані між випромінюючою і відбиваючою поверхнями в межах половини довжини стоячої хвилі, яка відбувається внаслідок зміни рівня; U_0 – амплітудне значення сигналу на виході приймача при вибраному режимі випромінювання і $\mathbf{h} = 0$, тобто при максимальному тиску стоячої хвилі на приймач; λ – довжина хвилі, що випромінюється.

Недоліком інтерференційних методів на стоячій хвилі є нелінійність статичної характеристики перетворення ПВП. Залежно від налаштування ПВП його статична характеристика перетворення (ХП) у відповідності до (1) може мати вигляд косинусоїди або синусоїди з методичною похибкою нелінійності δ_i , яка становить 21% у діапазоні вимірювання \mathbf{h} від 0 до $\pi/2$ радіан.

Така похибка може бути зменшена шляхом використання тільки відносно лінійної ділянки ХП. У цьому випадку залишкове значення похибки $\delta_i \leq 2,0\%$ може бути досягнуто в межах діапазону вимірювання $\approx 0,35(\pi/2)$ радіан. Проте такий спосіб є неефективним, оскільки дві третини діапазону вимірювання при цьому не використовується. Зменшення похибки δ_i можна досягти шляхом перетворення ХП у цифрову форму, її запам'ятовування і наступної лінеаризації у цифровій формі. У цьому випадку рівнемір має бути оснащений відповідним постійним запам'ятовуючим пристроєм і пристроєм

вибірки корекції.

Мета статті – створення способів лінеаризації **ХП** інтерференційних **ПВП** на стоячій хвилі, що побудовані на використуванні додаткових коригуючих аналогових сигналів, які виробляються в самому **ПВП** за допомогою додаткових приймачів, зсунутих по осі випромінювання – приймання ультразвукових коливань на одну восьму ($\lambda/8$), чверть ($\lambda/4$) і половину ($\lambda/2$) довжини ультразвукової хвилі, що випромінюється, тобто на $\pi/4$, $\pi/2$ та π , і які надають можливість без додаткових перетворень, одночасно з компенсацією факторів, що впливають на **ПВП**, отримати **ХП** з вихідним уніфікованим аналоговим сигналом **ПВП** по струму і необхідним значенням похибки нелінійності.

Виклад основного матеріалу. У разі застосування першого способу лінеаризації [2] в зону вимірювання додатково вводиться приймач зі зсувом по осі випромінювання – приймання коливань щодо основного вимірювального приймача на одну четверту довжини випромінюваної хвилі (на $\pi/2$ радіан). У випадку, якщо **ПВП** налаштований на косинусоїдальний вихідний сигнал, це дає змогу отримати коригуючий сигнал по діапазону вимірювання від 0 до $\pi/2$ виду:

$$\begin{aligned} U(\mathbf{h})_k &= U_0 |\cos \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{h} + \pi/2)| = \\ &= U_0 |\sin \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h}|, \end{aligned} \quad (2)$$

а як вихідний сигнал характеристики перетворення **ПВП** використовувати сигнал виду:

$$U_{1ПВП} = U_0 [1 + |\cos \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h}| - |\sin \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h}|]. \quad (3)$$

Якщо **ПВП** налаштувати на синусоїдальний вихідний сигнал, то вихідний сигнал характеристики перетворення **ПВП** з урахуванням косинусоїдального коригуючого сигналу буде мати вид:

$$U_{2ПВП} = U_0 [1 + |\sin \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h}| - |\cos \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h}|]. \quad (4)$$

Вихідний лінеаризований сигнал **ПВП** за формулами (3) і (4) пропорційний алгебраїчній сумі сигналів основного вимірювального приймача, інвертованого коригуючого сигналу і сигналу, рівного сумі квадратів сигналів обох приймачів. Спосіб надає можливість отримати залишкове значення методичної похибки нелінійності не більше 2,1% в діапазоні від 0 до $\pi/2$ радіан.

Другий спосіб лінеаризації [3] дає змогу довести похибку нелінійності до значення $\leq 1,05\%$ і одночасно розширити і діапазон вимірювання інтерференційного **ПВП** до половини довжини випромінюваної ультразвукової хвилі. При цьому як вихідний сигнал характеристики перетворення **ПВП** необхідно використовувати сигнал за діапазоном вимірювання, що описується системою рівнянь виду:

$$\begin{aligned} \{ U_{3ПВП} &= U_0 [3 + |\cos \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h}| - |\sin \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h}|], \quad (5) \\ \text{при } 0 < h < \frac{\pi}{2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{ U_{4ПВП} &= U_0 [1 - |\cos \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h}| + |\sin \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h}|], \quad (6) \\ \text{при } \frac{\pi}{2} < h < \pi; \end{aligned}$$

якщо **ПВП** налаштований на косинусоїдальний вихідний сигнал і вихідний сигнал, що описується системою рівнянь виду:

$$\begin{aligned} \{ U_{5ПВП} &= U_0 [1 + |\sin \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h}| - |\cos \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h}|], \quad (7) \\ \text{при } 0 < h < \frac{\pi}{2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{ U_{6ПВП} &= U_0 [3 - |\sin \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h}| + |\cos \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h}|], \quad (8) \\ \text{при } \frac{\pi}{2} < h < \pi; \end{aligned}$$

якщо **ПВП** налаштований на синусоїдальний вихідний сигнал.

Невизначеність, яка виникає при значеннях \mathbf{h} , що дорівнюють одній четвертій довжини хвилі ($\pi/2$ радіан), виключається за допомогою ключових елементів і компаратора, що керується другим коригуючим сигналом. Такий сигнал отримують на третьому додатковому приймачі, який зсунуто по осі випромінювання – приймання коливань на одну восьму ($\lambda/8$) довжини хвилі щодо першого (основного) приймача, тобто, на $\pi/4$ радіан.

Третій спосіб лінеаризації **ХП ПИП** [4] надає можливість отримати в діапазоні вимірювання $0 < h < \lambda/4$ ($0 < h < \pi/4$) похибку нелінійності, що не перевищує 0,24%. При реалізації способу необхідно отримати коригуючі сигнали виду:

$$\begin{aligned} U_{\kappa 1} &= U_0 [|\cos \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{h} \pm \frac{\lambda}{8})| - |\sin \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{h} \pm \frac{\lambda}{8})|] = \\ &= U_0 [|\cos(\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{h} \pm \frac{\pi}{4})| - |\sin \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{h} \pm \frac{\pi}{4})|] \end{aligned} \quad (9)$$

при лінеаризації косинусоїди, а при лінеаризації синусоїди виду:

$$U_{K2} = U_0 [|\sin \frac{2\pi}{\lambda} (h \pm \frac{\lambda}{8})| - |\cos \frac{2\pi}{\lambda} (h \pm \frac{\lambda}{8})|] = \\ = U_0 [|\sin(\frac{2\pi}{\lambda} h \pm \frac{\pi}{4})| - |\cos \frac{2\pi}{\lambda} (h \pm \frac{\pi}{4})|]. \quad (10)$$

Обидва коригуючі сигнали за залежностями (9) і (10) рівні за модулем різницям сигналів $U_0 (|\cos \frac{2\pi}{\lambda} h| - |\sin \frac{2\pi}{\lambda} h|)$ і $U_0 (|\sin \frac{2\pi}{\lambda} h| - |\cos \frac{2\pi}{\lambda} h|)$, що визначаються залежностями (3) та (4), але зсунуті по осі випромінювання – прийому на одну восьму довжини випромінюваної хвилі, тобто на $+\pi/4$ та $-\pi/4$ радіан залежно від меж зміни рівня. Це дає можливість отримати характеристику перетворення ПВП у разі лінеаризації косинусоїди, яка описується системою рівнянь:

$$\{U_{7ПВП} = U_0 [3 + |\cos \frac{2\pi}{\lambda} h| - |\sin \frac{2\pi}{\lambda} h|] + \\ + U_0 [|\cos(\frac{2\pi}{\lambda} h - \frac{\pi}{4})| - |\sin \frac{2\pi}{\lambda} (h - \frac{\pi}{4})|] = \\ = U_0 [3 + |\cos \frac{2\pi}{\lambda} h| - 2,4142 |\sin \frac{2\pi}{\lambda} h|], \quad (11)$$

при $0 < h < \lambda/4$ ($0 < h < \pi/4$);

$$\{U_{8ПВП} = U_0 [1 + 2,4142 |\cos \frac{2\pi}{\lambda} h| - |\sin \frac{2\pi}{\lambda} h|], \quad (12)$$

при $\lambda/4 < h < \lambda/2$ ($\pi/4 < h < \pi/2$).

У разі лінеаризації синусоїдальної ХП ПВП за таким способом вихідний сигнал ПВП описується відповідно системою рівнянь:

$$\{U_{9ПВП} = U_0 [1 + 2,4142 |\sin \frac{2\pi}{\lambda} h| - |\cos \frac{2\pi}{\lambda} h|], \quad (13)$$

при $0 < h < \lambda/4$ ($0 < h < \pi/4$);

$$\{U_{10ПВП} = U_0 [1 + |\sin \frac{2\pi}{\lambda} h| - 2,4142 |\cos \frac{2\pi}{\lambda} h|], \quad (14)$$

при $\lambda/4 < h < \lambda/2$ ($\pi/4 < h < \pi/2$).

Суттєве зниження похибки нелінійності може бути досягнуто в разі використання способу [5], під час реалізації якого вихідна ХП ПВП описується залежністю виду:

$$U_{11ПВП} = U_0 \frac{\sin \frac{2\pi}{\lambda} h - \cos \frac{2\pi}{\lambda} h}{1 - b(\sin \frac{2\pi}{\lambda} h - \cos \frac{2\pi}{\lambda} h)^2}, \quad (15)$$

якщо інтерференційний ПВП налаштований на синусоїдальний вихідний сигнал, а при сигналі у вигляді косинусоїди – залежністю виду:

$$U_{12ПВП} = U_0 \frac{\cos \frac{2\pi}{\lambda} h - \sin \frac{2\pi}{\lambda} h}{1 - b(\cos \frac{2\pi}{\lambda} h - \sin \frac{2\pi}{\lambda} h)^2}. \quad (16)$$

При значенні коефіцієнта глибини корекції b , що дорівнює 0,107, похибка нелінійності в діапазоні вимірювання $0 < h < \lambda/4$ ($0 < h < \pi/2$) не перевищує 0,08%.

Описані коригуючі сигнали отримують з метою компенсації факторів, які впливають на роботу ПВП (зміни градієнтів швидкості повітряних потоків і температури в зоні вимірювання). Тому додаткове опрацювання таких сигналів за наведеними вище залежностям з метою отримання вихідного аналогового сигналу з необхідною похибкою нелінійності є особливо ефективним.

Висновки

Розглянуті способи лінеаризації можуть використовуватися з іншими ПВП, які мають гармонійну вихідну характеристику перетворення. Доцільність використання кожного з цих способів має визначитися необхідним діапазоном вимірювання, допустимим залишковим значенням методичної похибки нелінійності і можливістю отримання коригуючих сигналів.

ЛІТЕРАТУРА

1. А.с. №1397730. Ультразвуковой интерферометрический толщиномер / А. И. Ришан // Открытия. Изобретения. – 1988. – БИ №19.
2. А.с. №997049. Устройство для линейаризации нелинейных характеристик / А. И. Ришан // Открытия. Изобретения. – 1983. – БИ №6.
3. А.с. №1047268. Ультразвуковой интерферометрический толщиномер / А. И. Ришан // Открытия. Изобретения. – 1989. – БИ №19.
4. А.с. №964659. Устройство для линейаризации нелинейных характеристик / А. И. Ришан // Открытия. Изобретения. – 1982. – БИ №37.
5. А.с. №1173422. Устройство для линейаризации синусно-косинусных характеристик датчика / А. И. Ришан // Открытия. Изобретения. – 1985. – БИ №30.