

УДК 531.768

Акустоелектронний перетворювач лінійних та кутових переміщень

Дербанов Є.П., Коротков М.І., к.т.н., с.н.с. Жовнір М.Ф.

Вимірювальні перетворювачі (ВП) фізичних та механічних величин на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) при застосуванні частотного або фазового методів вимірювання забезпечують велику чутливість і точність перетворення інформації в широкому динамічному діапазоні [1-5]. В основі більшості таких ВП лежить високостабільний ПАХ-генератор, що складається з регульованої під впливом фізичних або механічних величин лінії затримки на ПАХ, яка ввімкнена в ланцюг зворотного зв'язку підсилювача. Застосування частотного метода вимірювання дозволяє отримувати високу роздільну здатність і точність.

Однак, у випадку необхідності вимірювання лінійних або кутових переміщень в динамічному діапазоні до 100 мм (360 кут.град.) необхідно застосовувати фазовий метод вимірювання. Для усунення багатозначності фазових вимірювань доцільно застосування метода вимірювання на основі використання фазового набігання кількох поверхневих акустичних хвиль, що збуджуються в звукопроводі на різних частотах, на яких вимірюються інформаційні параметри, що визначають

положення рухомого приймача ПАХ [1-2].

В цій роботі проведена оцінка роздільної здатності та точності 3-х частотного ВП лінійних та кутових переміщень на ПАХ, що поширюються по поверхні п'єзоелектричного звукопроводу, з рухомим приймачем ПАХ.

На рис.1 представлена функціональна схема ВП на ПАХ при збудженні хвилі у вигляді суперпозиції 3-х поверхневих акустичних хвиль з частотами $f_2 < f_1 < f_3$. Первинний перетворювач складається із п'єзоелектричного звукопроводу (хвилеводу) 1 з поглиначами ПАХ 2 та 3, необхідних для створення режиму біжучих хвиль, вхідного та контрольного зустрічно-штирових перетворювачів (ЗШП) 4 і 5, сформованих на п'єзоелектричному звукопроводі, над яким на відстані X , не більшій довжини поверхневих акустичних хвиль, переміщується приймач ПАХ 6, виконаний у вигляді ЗШП, сформованого на діелектричній пластині.

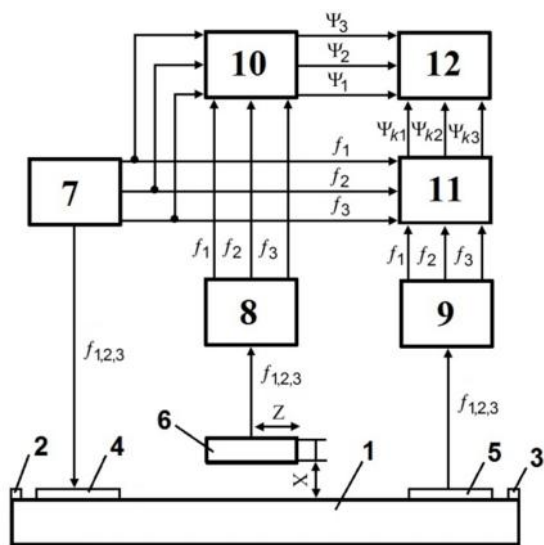


Рис.1. Функціональна схема ВП на ПАХ

Електричний сигнал з генераторного блоку 7, що складається із трьох високостабільних генераторів та суматора, подається на вхідний ЗШП і збуджує ПАХ, яка приймається рухомим приймачем 6 і контрольним ЗШП 5, вихідні сигнали з яких поступають на блоки підсилення і фільтрації 8 і 9, що складаються із високочастотних підсилювачів та 3-х фільтрів відповідно на частоти $f_{1,2,3}$. Після підсилення та фільтрації вихідні сигнали з блоків 8 і 9 поступають на фазометричні блоки 10 та 11, на які поступають також сигнали з генераторного блоку. Результати вимірювання фаз ψ_1, ψ_2, ψ_3 сигналів з рухомого приймача поступають в блок оброблення та формування трьох вимірювальних шкал перетворювача 12.

Одночасно в блок 12 поступають результати вимірювання

фаз сигналів $\psi_{k1}, \psi_{k2}, \psi_{k3}$ при дії дестабілізуючих факторів на звукопровід.

Наприклад, для формування точної шкали використовуються результати вимірювання ψ_1 на частоті f_1 . Визначаючи $\psi_{12} = \psi_1 - \psi_2$ або $\psi_{13} = \psi_1 - \psi_3$ можна сформувати проміжну шкалу, а визначення $\psi_{123} = \psi_{13} - \psi_{12}$ дозволить сформувати грубу шкалу перетворювача.

Повний фазовий набіг кожної хвилі на ділянці звукопроводу від вхідного ЗШП до приймача ПАХ можна представити у вигляді:

$$\Phi_{1,2,3} = \Delta\Phi_{1,2,3} + \beta_{1,2,3}Z = \Delta\Phi_{1,2,3} + 2\pi N_{1,2,3} + \Psi_{1,2,3},$$

де $\Delta\Phi_{1,2,3}$ – початкові фази ПАХ, для спрощення подальшого опису метода приймаємо $\Delta\Phi_1 = \Delta\Phi_2 = \Delta\Phi_3 = 0$; $\beta_{1,2,3}$ і $\lambda_{1,2,3}$ – відповідно хвильові числа і довжини ПАХ на частотах $f_{1,2,3}$, що визначаються співвідношеннями:

$$\beta_{1,2,3} = 2\pi/\lambda_{1,2,3} = 2\pi f_{1,2,3}/V;$$

$$\lambda_{1,2,3} = \lambda_1/(1 - \delta_{1,2,3}),$$

де $\delta_{1,2,3} = (f_1 - f_{1,2,3})/f_1$ – частотне розстроювання; $\lambda_1 = V/f_1$ – довжина ПАХ на частоті f_1 ; $N_{1,2,3}$ – кількість довжин хвиль (число циклів фази) на відповідних частотах на довжині звукопроводу Z ; $\Psi_{1,2,3}$ – дробні частки фазового набігання на частотах $f_{1,2,3}$ фіксуються фазометрами, що дозволяють однозначно визначати положення рухомого приймача ПАХ в межах відповідних довжин хвиль $\lambda_{1,2,3}$, які в високоточних перетворювачах

переміщень можуть приймати значення $\lambda = 10 \dots 100$ мкм.

При вимірюванні кутових переміщень звукопровід (хвилевід) виконується кільцевим, а переміщення приймача здійснюється по дузі $Z = R \cdot \varphi$, де R – радіус хвилевода і приймача; φ – кут обертання в радіанах.

Чутливість перетворювача на точній шкалі визначається співвідношеннями:

- лінійних переміщень:

$$S_{1z} = d\Psi_1/dZ = 2\pi/\lambda_1;$$

- кутових переміщень:

$$S_{1\varphi} = d\Psi_1/d\varphi = 2\pi R/\lambda_1.$$

Гранично допустиме значення переміщення, що може однозначно визначатися на точній шкалі, обмежується значенням $Z_{1m} = \lambda_1$ ($\varphi_{1m} = \lambda_1/R$).

Розширення діапазону можливо при використанні різниці повних фазових набігань ПАХ, які представляються системою рівнянь:

$$\Phi_{12} = \Phi_1 - \Phi_2 = \beta_{12}Z = 2\pi N_{12} + \Psi_{12};$$

$$\Phi_{13} = \Phi_1 - \Phi_3 = \beta_{13}Z = 2\pi N_{13} + \Psi_{13},$$

$$\text{де } \beta_{12} = \beta_1 - \beta_2 = 2\pi/\Lambda_{12} = 2\pi F_{12}/V;$$

$$\beta_{13} = \beta_1 - \beta_3 = 2\pi/\Lambda_{13} = 2\pi F_{13}/V;$$

$$\Lambda_{12} = \lambda_1/\delta_1 = P_2\lambda_1; \quad \Lambda_{13} = \lambda_1/\delta_3 = P_3\lambda_1;$$

$$F_{12} = \delta_2 f_2; \quad F_{13} = \delta_3 f_1; \quad P_2 = 1/\delta_2; \quad P_3 = 1/\delta_3;$$

Λ_{12} та Λ_{13} – ефективні довжини хвиль на частотах биття F_{12} та F_{13} ; $N_{12} = N_1 - N_2$ та $N_{13} = N_1 - N_3$ – кількість довжин хвиль Λ_{12} та Λ_{13} на ділянці звукопровода Z ; P_2 та P_3 –

коефіцієнти редукції фаз проміжних шкал (число циклів точної шкали, що розміщуються в одному циклі проміжних шкал), для формування яких використовуються результати вимірювання різниць дробних часток фазових набігань $\Psi_{12} = \Psi_1 - \Psi_2$ та $\Psi_{13} = \Psi_1 - \Psi_3$, алгоритм визначення яких можна представити наступним чином:

$$\Psi_{12} = \Psi_1 - \Psi_2 \text{ при } \Psi_1 - \Psi_2 \geq 0;$$

$$\Psi_{12} = \Psi_1 - \Psi_2 + 2\pi \text{ при } \Psi_1 - \Psi_2 < 0;$$

$$\Psi_{13} = \Psi_1 - \Psi_3 \text{ при } \Psi_1 - \Psi_3 \geq 0;$$

$$\Psi_{13} = \Psi_1 - \Psi_3 + 2\pi \text{ при } \Psi_1 - \Psi_3 < 0.$$

Для формування проміжної шкали використовуємо результати вимірювання різниці дробних часток фазових набігань $\Psi_{12} = \Psi_1 - \Psi_2$, а гранично допустиме переміщення, що може однозначно визначатися на проміжній шкалі, обмежується значенням

$$Z_{2m} = P_2\lambda_1 \quad (\varphi_{2m} = P_2\varphi_{1m} = P_2\lambda_1/R)$$

при чутливості перетворювача:

$$S_{2z} = d\Psi_{12}/dZ = S_{1z}/P_2;$$

$$S_{2\varphi} = d\Psi_{12}/d\varphi = S_{1\varphi}/P_2.$$

Подальше розширення діапазону можливо при формуванні третьої (грубої) шкали перетворювача, для цього скористаємося різницею різниць повних фазових набігань, що можна представити у вигляді:

$$\Phi_{123} = \Phi_{12} - \Phi_{13} = \beta_{123}Z = 2\pi N_{123} + \Psi_{123},$$

$$\text{де } \beta_{123} = \beta_{12} - \beta_{13} = 2\pi/\Lambda_{123} = 2\pi F_{123}/V;$$

$$\Lambda_{123} = P_{123}\lambda_1 = P_{12}\Lambda_{12} = P_{13}\Lambda_{13};$$

$$F_{123} = (\delta_2 - \delta_3)f_1 = f_1/P_{123};$$

$$P_{12} = \delta_2 / (\delta_2 - \delta_3); \quad P_{13} = \delta_3 / (\delta_2 - \delta_3);$$

$$P_{123} = 1 / (\delta_2 - \delta_3) = P_2 P_{12} = P_3 P_{13} = P_2 P_3 / (P_3 - P_2),$$

де β_{123} і Λ_{123} – ефективні хвильове число та довжина ПАХ на частоті биття F_{123} ; P_{12} і P_{13} – число циклів проміжних шкал, що розміщуються в одному циклі грубої шкали; N_{123} – кількість довжин хвиль Λ_{123} на ділянці звукопроводу Z ; P_{123} – коефіцієнт редукції фази третьої (грубої) вимірювальної шкали (число циклів точної шкали, що розміщується в одному циклі грубої шкали), для формування якої використовуються результати вимірювання різниць дробних часток фазових набігань $\Psi_{123} = \Psi_{13} - \Psi_{12}$, алгоритм визначення яких має вигляд:

$$\Psi_{123} = \Psi_{13} - \Psi_{12} \text{ при } \Psi_{13} - \Psi_{12} \geq 0;$$

$$\Psi_{123} = \Psi_{13} - \Psi_{12} + 2\pi \text{ при } \Psi_{13} - \Psi_{12} < 0.$$

Для формування грубої шкали використовуємо результати вимірювання різниць дробних часток фазових набігань $\Psi_{123} = \Psi_{13} - \Psi_{12}$, а гранично допустиме переміщення, що може однозначно визначатися по грубій шкалі, обмежується значенням

$$Z_{3m} = P_{123} \lambda_1 (\varphi_{3m} = P_{123} \varphi_{1m})$$

при чутливості перетворювача:

$$S_{3Z} = d\Psi_{123} / dZ = S_{1Z} / P_{123};$$

$$S_{3\varphi} = d\Psi_{123} / d\varphi = S_{1\varphi} / P_{123}.$$

Необхідно відмітити, що при реалізації описаного позиційного перетворювача необхідно забезпечити жорстке спряження

трьох вимірювальних шкал, що можливо

при виконанні умови:

$$P_{123} = P_2 P_{12} = P_3 P_{13}.$$

Результати розрахунків показують, що при роздільній здатності $\psi_{\min} = 0,1$ ел.град. та похибці $\Delta\psi = \pm 0,5$ ел.град. промислових фазометрів 3-х частотний ВП на ПАХ лінійних та кутових переміщень при $f_1 = 70$ МГц, $\delta_2 = 1/64$ і $\delta_3 = 31/2048$ має потенційні параметри:

- діапазон переміщень: 0...100 мм (0...360 кут.град.);
- роздільна здатність на точній шкалі: 0,013 мкм (0,175 кут.сек.);
- похибка на точній шкалі: $\pm 0,065$ мкм ($\pm 0,87$ кут.сек.).

Література

1. Жовнір М.Ф., Черняк М.Г., Дідківський А.А. та інш. Фізико-технічні основи побудови вимірювального перетворювача мікропереміщення на поверхневих акустичних хвилях // Електроніка и связь. – 2004, № 23. – С.5-8.
2. Жовнір М.Ф., Черняк М.Г., Черненко Д.В. та інш. Вимірювальні перетворювачі фізичних величин на поверхневих акустичних хвилях // Електроніка и связь. – 2011, № 1(60). – С.153-157.

3. Поляков П.Ф., Хорунжий В.А., Поляков В.П. Акустоэлектроника. Физико-технологические основы и применение: Справ. пособие: Том 1.- Харьков:ООО «Компания СМІТ», 2007. – 552 с.
4. Черненко Д.В., Кузьменко О.М., Жовнір М.Ф. Вимірювальні перетворювачі тиску на основі збурення електричного поля поверхневих акустичних хвиль // Вісник Кременчукського національного університету імені МихайлаОстроградського. – Кременчук: КрНУ. – 2013. – Вип. 1(78). – С. 62-66.
5. Chernenko D., Zhovnir M., Oliinyk O., Tsyganok B. Wireless Passive Sensor Using Frequency Coded SAW Structures //35thInternational Spring Seminar on Electronics Technology „Power Electronics” (ISSE 2012). –Bad Aussee (Austria). – 2012. – P. 424 – 428.