

ФУНКЦІОНАЛЬНА ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.314

ПЕРЕТВОРЮВАЧ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ

Піддубний В. О.¹, к.т.н. доцент; Піддубний В.В., інж.²

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

²Підприємство «Інфопульс Україна» м. Київ, Україна

Розвиток та вдосконалення систем керування, ускладнення задач, які вирішуються сучасними технологічними, навігаційними та вимірювальними системами, вимагають розробки високоточних перетворювачів механічних величин (ПМВ). Одним з перспективних напрямків розвитку таких ПМВ є створення акустoeлектронних вимірювальних перетворювачів. Існує декілька структурних схем побудови вторинних ПМВ на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ). Це перетворювачі з частотним вихідним сигналом та диференціальні перетворювачі (частотний, перетворювач, що працює в режимі відношення частот, перетворювач без початкового розносу частот), які достатньо описані в літературі, наприклад [1-3]. Вони мають різні точнісні характеристики, які залежать від структури перетворювача та їх конструктивних особливостей, та спільні недоліки – наявність двох ПАХ генераторів, технологічні проблеми при виготовленні чутливого елемента (ЧЕ) та температурну залежність вихідної частоти.

Метою даної роботи є аналіз відомих структурних схем ПМВ, висвітлення їх переваг та недоліків, розробка структурної схеми перетворювача вільного від виявлених недоліків.

Диференціальний функціональний перетворювач

Структурна схема диференціального перетворювача показана на прикладі барометричного вимірювача тиску (рис.1). Чутливим елементом (ЧЕ) вимірювача є профільована мембрана з п'єзоелектричного матеріалу 1 з прийомною порожниною 2.

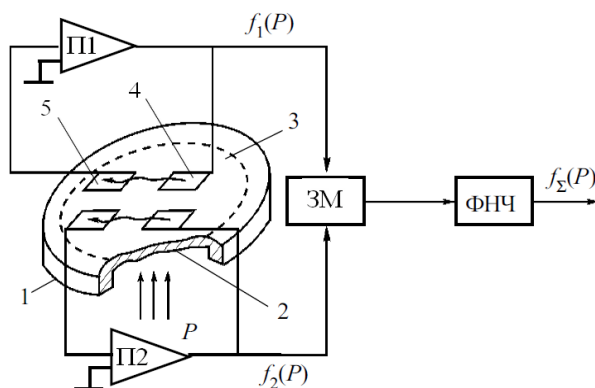


Рис.1. Барометричний перетворювач на ПАХ

кладі барометричного вимірювача тиску (рис.1). Чутливим елементом (ЧЕ) вимірювача є профільована мембрана з п'єзоелектричного матеріалу 1 з прийомною порожниною 2. На деформованій під дією зовнішньої вимірюваної механічної величини X (в даному випадку тиску P) поверхні 3 мембрани виготовлені вхідний 4 та вихідний 5 зу-

стрічно-штиреві перетворювачі (ЗШП) ЛЗ1 та ЛЗ2. Лінії затримки розміщені в місцях ЧЕ з протилежним знаком деформації. ЛЗ1 та ЛЗ2 з'єднані з високочастотними підсилювачами (ВЧП) П1 та П2 і створюють два ПАХ генератори. Власні частоти генераторів відрізняються одна від одної на величину базової частоти $f_{0\Sigma}$, яка визначається при відсутності впливу механічної величини, значення якої вимірюється ($X = 0$).

Базова частота $f_{0\Sigma}$, що утворюється на змішувачі ЗМ, виділяється на ФНЧ з комбінаційних частот $f_{0\Sigma} = f_{01} - f_{02}$, де f_{01} та f_{02} - вихідні частоти першого та другого генераторів. Вихідна частота перетворювача під дією зовнішніх впливів (вимірюваної величини X , температури ΔT та часу t) змінюється і визначається виразом $f_{\Sigma} = f_{01} - f_{02} \approx k_{X\Sigma}X + f_{0\Sigma}(1 + k_T\Delta T + k_{CT}t)$, де $k_{X\Sigma}$ - сумарний коефіцієнт деформаційної чутливості (залежить від - коефіцієнт температурної чутливості ПАХ генератора k_X та місця розміщення ЛЗ на поверхні ЧЕ), при однаковій деформаційній чутливості ПАХ генераторів та протилежної за знаком деформації ЧЕ $k_{X\Sigma} \approx 2f_{0\Sigma}k_X$, k_X залежить від фізичних (маса, модуль Юнга) матеріалу ЧЕ та його геометричних розмірів, k_{CT} - коефіцієнт довгострокової нестабільності зміщення нуля (коефіцієнт старіння). Значення $k_{X\Sigma}X$ визначає максимальну девіацію базової частоти, $k_T\Delta T f_{\Sigma 0}$ - температурну стабільність перетворювача, а $k_{CT}t f_{\Sigma 0}$ - зміщення нуля за рахунок старіння.

Із-за безпосередньої близькості розміщення елементів ПАХ генераторів та ЛЗ1 та ЛЗ2, виготовлених на спільному звукопроводі ЧЕ виникає паразитний зв'язок між генераторами (взаємна синхронізація). Це призводить до дрейфу базової частоти, яка складає сотні Гц за 6 годин безперервної роботи ПМВ. Причому встановлено, що чим менший рознос частот, тим більший вплив одного генератора на інший а це призводить до збільшення нелінійності вихідної характеристики ПМВ зі зближенням частот між собою [4].

Зменшення дрейфу досягається оптимізацією структури ЛЗ та використанням електромагнітного та електростатичного екранування. ВЧП екрануються шляхом виготовлення їх в стандартних металоскляних корпусах, наприклад корпусах типу 151.15-2, ЛЗ – екранами спеціальної конструкції. Вплив спільних сигнальних кіл (кола змішувача та кола живлення) можна майже виключити використанням правильно вибраних змішувача та фільтрів в колах живлення.

Диференціальний перетворювач на диференційних підсилювачах

Крім екранування зменшити електромагнітний зв'язок між генераторами можна шляхом заміни аперіодичних ВЧП зі спільним емітером або базою на диференційні підсилювачі (ДП) нечутливі до синфазних перешкод та введенням акустичної розв'язки генераторів з вхідними колами змі-

шувача [5].

В таких ПМВ один із ЗШП лінії затримки під'єднаний до диференційного виходу ДП а інший - до його входу, утворюючи коло позитивного зворотного зв'язку ПАХ генератора. В такому ввімкненні електромагнітне поле, яке визване струмами, що протікають одному генераторі, є диференційними для даного генератора і синфазним для сусіднього, тому вплив одного генератора на інший послаблений. Вихідний сигнал генератора знімається з додаткового ЗШП акустичної розв'язки, що значно зменшує вплив навантаження на режим його роботи.

Зручними для використання в ПАХ генераторах є ДП з малим рівнем спотворень компанії Analog Devices типу ADL5561 та ADL5562. Вони працюють на частотах до 500 МГц, що охоплює весь діапазон роботи ЛЗ на ПАХ. Їх використання дозволяє створювати ПМВ з декілька раз меншим дрейфом базової частоти.

Диференціальний перетворювач в режимі відношення частот

Суттєве поліпшення метрологічних характеристик ПМВ може бути отримане переведенням роботи диференціального перетворювача в режим відношення частот f_{Σ}/f_2 , де f_2 - частота одного з ПАХ генераторів, наприклад другого. Для нього, враховуючи, що значення k_{CT} достатньо мале ($k_{CT} \approx (0,1...0,5) \cdot 10^{-4}$ 1/рік) і ним можна знехтувати, маємо:

$$\begin{aligned} \frac{f_{\Sigma}}{f_2} &= \frac{f_{0\Sigma}(1 + k_T \Delta T + k_{CT}t) + k_{X\Sigma} X_1}{f_{02}(1 - k_X X_1 + k_T \Delta T + k_{CT}t)} = \frac{f_{0\Sigma}(1 + k_T \Delta T) + 2f_{02}k_X X_1}{f_{02}(1 - k_X X_1 + k_T \Delta T)} = \\ &= \frac{f_{0\Sigma}}{f_{02}}(1 - k_T^2 \Delta T^2) + \frac{f_{0\Sigma}}{f_{02}} k_{X\Sigma} X_1 + \frac{f_{0\Sigma}}{f_{02}} k_{X\Sigma} X_1 k_T \Delta T + 2k_{X\Sigma} X_1 + 2(k_{X\Sigma} X_1)^2 - \\ &- 2k_{X\Sigma} X_1 k_T \Delta T. \end{aligned}$$

Інформаційним параметром є вираз $2k_X X_1$. Складові другого порядку $\frac{f_{0\Sigma}}{f_{02}} k_{X\Sigma} X_1$, $\frac{f_{0\Sigma}}{f_{02}} k_{X\Sigma} X_1 k_T \Delta T$, $2(k_{X\Sigma} X_1)^2$, $2k_{X\Sigma} X_1 k_T \Delta T$ набагато менші, тому можна вважати, що відношення частот f_{Σ}/f_2 при відсутності дії вимірюваної величини не залежить від температури

$$\frac{f_{\Sigma}}{f_2} = \frac{f_{0\Sigma}}{f_{02}} + 2k_{X\Sigma} X_1.$$

При $X_1 \neq 0$ внаслідок впливу складових другого порядку базова частота стає температурнозалежною. Однак адитивна температурна похибка та довготривала нестабільність базової частоти зменшується в 5...7 разів в порівнянні з традиційною диференціальною схемою і складає $5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ та 0,02...0,05% відповідно.

Структурна схема, яка реалізує метод, описана в [1] та зображена на рис.2. Вона складається з двох ПАХ автогенераторів (АГ1 та АГ2) з ЛЗ, розміщеними на деформованій поверхні ЧЕ та змішувача ЗМ, формувачів імпульсів ФІ вихідної частоти, імпульсів частоти f_2 , інтервалу вимірювань ФІВ та лічильника імпульсів ЛІ.

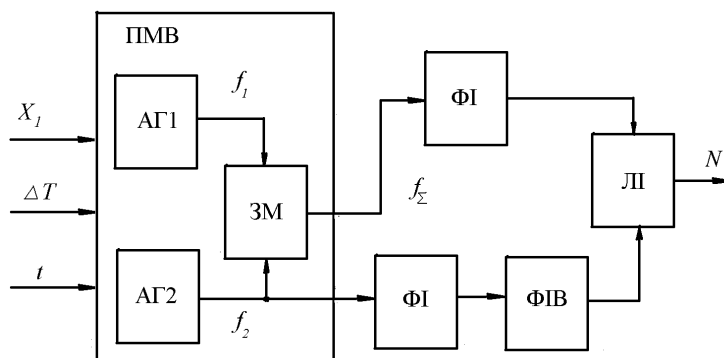


Рис.2. Диференціальний перетворювач в режимі відношення частот

На виході лічильника число імпульсів пропорційне вимірюваному параметру X_1 :
$$N = \frac{T_e}{t_2} = n \frac{f_\Sigma}{f_2} = n \left(\frac{f_{0\Sigma}}{f_{02}} + 2k_{X\Sigma} X_1 \right) \pm 1$$
, де n - ціле число.

Диференціальний перетворювач без початкового розносу частот

В [2] запропонована структурна схема диференціального перетворювача без початкового розносу частоти (рис.3). В такій схемі ПАХ генератори утворюються двома ВЧП

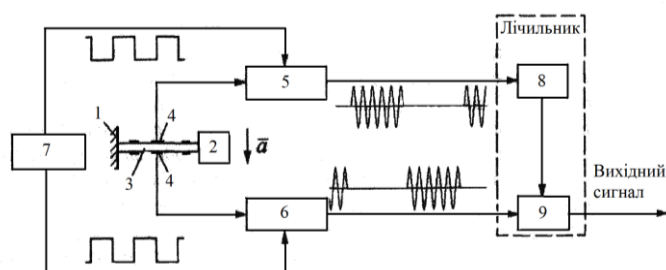


Рис.3. Структурна схема ПМВ без початкового розносу частот

5 та 6 та лініями затримки 4, які розміщені на консолі 3, закріпленій на основі 1. Генератори настроєні на однакові початкові частоти $f_{01} = f_{02}$ і працюють в імпульсному режимі, який задається модулятором 7. Вони по чергово працюють на протязі часу $T/2$, де T - період повторення ввімкнення генераторів. Вихідні сигнали ПАХ генераторів, перетворені вихідними каскадами ВЧП послідовності імпульсів, подаються на лічильники 8 та 9.

В початковий момент часу модулятор 7 включає перший генератор, коливання з якого поступають на вхід прямого лічильника 8, де фіксується кількість імпульсів за перший напівперіод вимірювань. Потім модулятор 7 відключає перший генератор та включає другий, сигнал з виходу якого поступає на реверсивний лічильник 9, на якому фіксується кількість імпульсів за другий напівперіод вимірювань. На виході реверсивного лічильника

9 формується різниця між накопиченими імпульсами за перший та другий напівперіоди вимірювань, яка пропорційна вимірюваному параметру.

При відсутності вимірюваної величини частоти генераторів однакові $f_{01} = f_{02} = f_0$ та не змінюються. Кількість імпульсів на виході дорівнює нулю. Під дією механічної величини, значення якої вимірюється, частоти генераторів f_1 та f_2 змінюються на величину $\pm f_0 k_X X_1$ та приймають значення $f_1 = f_0(1 + k_X X_1 + k_T \Delta T)$; $f_2 = f_0(1 - k_X X_1 + k_T \Delta T)$. На виході лічильника 9 число імпульсів пропорційне різниці частот $f_1 - f_2 = 2f_0 k_X X_1$, тобто значенню вимірюваного параметру X_1 .

Завдяки почерговому ввімкненню генераторів вони практично не впливають на роботу один одного а вибраний метод обробки сигналу забезпечує практично нульову температурну чутливість при нульовому значенні вимірюваної величини. Однак і в цьому методі повністю не виключається залежність вихідного сигналу перетворювача від температури. Так, при дії збуджуючого фактору X ПАХ генератори мають різні за знаком відхилення частоти, тому виникає різниця частот навіть при їх нульовому початковому розносі. А відповідно виникає температурна залежність вимірюваного параметру від його величини $\Delta f_T = k_T \Delta T (f_{X1} - f_{X2}) = 2k_T \Delta T (X_1 - X_2)$, де Δf_T - зміна частоти за рахунок ΔT , f_{X1} та f_{X2} - частоти першого та другого генераторів при зміні вимірюваного параметру в діапазоні $(X_1 - X_2)$. Це явище може бути усунено автоматичним підтримання нульового значення базової частоти $\Delta f = 0$ шляхом компенсації значення вимірюваного параметру X системою зворотного зв'язку.

Компенсаційний перетворювач на ПАХ

Автоматичне підтримання нульового значення частоти досягається за рахунок побудови ПМВ за замкненою компенсаційною схемою [6]. Такий ПМВ на ПАХ повинен в своєму складі повинен мати:

вузол визначення відхилення частоти – частотний або фазовий детектор;

вузол формування сигналу похибки;

пристрій автопідстроювання базової частоти (компенсатор вимірюваного параметру).

Структурна схема компенсаційного ПМВ з електричним управлінням частотою на прикладі барометричного вимірювача тиску приведена на рис. 4. На ньому: 1 – п'єзоелектрична мембрана, 2, 3, 4 – зустрічно-штиреві перетворювачі (ЗШП) ЛЗ на ПАХ, 5 – високочастотний підсилювач (ВЧП), 6 – фазовий модулятор (варікап підстроювання частоти), 7 – фазовий детектор, 8 – АЦП, 9 – мікроконтролер обробки вихідного сигналу. Такий ПМВ в своєму складі має лише один підстроюваний за допомогою варікапа ПАХ

генератор. Підстройка частоти дозволяє регулювати частоту генерації в межах смуги пропускання ЛЗ з крутістю характеристики $453 \cdot 10^{-6} \text{ 1/V}$ при зміні напруги управління в межах $0,3 \dots 3 \text{ В}$. Це повністю перекриває технологічні похибки виготовлення ЛЗ на ПАХ та дозволяє підстроювати частоту в діапазоні температур від -40 до $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

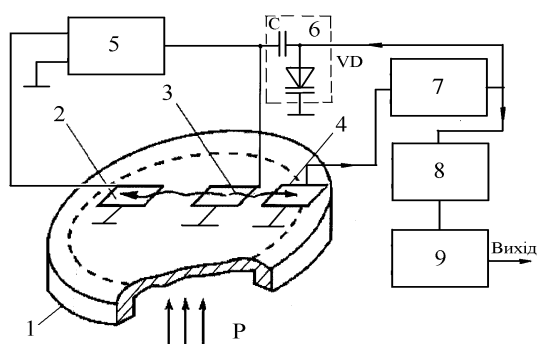


Рис.4. Структурна схема компенсаційного ВП на ПАХ

Одногенераторність вирішує питання пов'язане з дрейфом базової частоти та дозволяє значно зменшити нелінійність характеристики радування, які виникають в диференціальних із-за роботи ПАХ енергетиків на близьких частотах. Лінія затримки в такому ПМВ складається з трьох ЗШП виготовлених на одному звукопроводі-мембрані, два з яких 2 та 3 розміщені в зоні

деформації мембрани та використовуються в генераторі, та один 4 розміщений в зоні відсутності деформації (використовується в схемі фазового детектора). Недоліком схеми є відсутність врахування нелінійності пружних характеристик ЧЕ та наявність АЦП, який може вносити додаткову похибку в точність вимірювання.

Для зменшення впливу нелінійності пружних характеристик необхідно механічно повертати ЧЕ в початкове положення. Це може бути зроблене за допомогою електромагнітного чи п'єзоелектричного компенсатора (зовнішніх електромагніту чи п'єзоелектричного мікропереміщувача). Однак їх конструкція потребує подальшої розробки.

Радіоелементною базою при виготовленні ПМВ, можуть бути мікросхеми типу ADL5561 (високочастотній підсилювач в складі ПАХ генератора) та TDA7021 (фазовий детектор системи автопідстроювання частоти). Така елементна база нормально працює на частотах до 110 МГц і обмежена частотним діапазоном мікросхеми TDA7021. АЦП та мікроконтролер можуть бути будь-якого типу, наприклад серії PIC24H.

Висновки

Таким чином розроблена структурна схема перетворювача механічних величин на поверхневих акустичних хвилях компенсаційного типу, елементна база та технічні рішення, які запропоновані для подальшого використання, дозволять створити ПМВ з високими метрологічними характеристиками.

Література

1. Черняк М.Г. Акустoeлектронні низькочастотні лінійні акселерометри для систем управління рухомих об'єктів / М.Г.Черняк // Механіка гіроскопічних си-

стем. – 2008. – №19. – С. 116–124.

2. Лукьянов Д.П. [Анализ возможностей повышения температурной стабильности дифференциальных частотных преобразователей](#) / Д.Л. Лукьянов, С.Ю. Шевченко, А.С. Кукаев, Д.В. Сафронов // [Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ"](#). – 2009. – №7. – С. 51–62.

3. Піддубний В.В. Зменшення температурної похибки вимірювання перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях / В.В. Піддубний, В.О. Піддубний // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2010. – Вип.5. – С. 5–17.

4. Шевченко С.Ю. Разработка акселерометра на поверхностных акустических волнах : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Шевченко Сергей Юрьевич. – С.П., 2007. – 18 с.

5. Піддубний В.В. Зменшення взаємного впливу генераторів в перетворювачах механічних величин на поверхневих акустичних хвилях / В.В. Піддубний, О.В. Малюкін, В.О. Піддубний // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2010. – № 40. – С. 73–76.

6. Піддубний В.В. Шляхи поліпшення метрологічних характеристик перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях / В.В. Піддубний, А.С. Іванов, В.О. Піддубний // 7-я Междунар. Молодежная НТК. „Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций” (РТ-2011) / Изд-во СевНТУ – Севастополь, 2011. – С. 281.

*Піддубний В.О., Піддубний В.В. **Перетворювач механічних величин на поверхневих акустичних хвилях.** Проаналізовані структурні схеми перетворювачів механічних величин на поверхневих акустичних хвилях, розглянута схема компенсаційного перетворювача механічних величин, обговорені питання підвищення точності вимірювання*

***Ключові слова:** перетворювач механічних величин на поверхневих акустичних хвилях, диференційний підсилювач, ПАХ генератор, лінія затримки на ПАХ.*

*Поддубный В.О., Поддубный В.В. **Преобразователь механических величин на поверхностных акустических волнах.** Проанализированы структурные схемы преобразователей механических величин на поверхностных акустических волнах, рассмотрена схема компенсационного преобразователя механических величин, обсуждаются вопросы повышения точности измерения*

***Ключевые слова:** преобразователь механических величин на поверхностных акустических волнах, дифференциальный усилитель, ПАВ-генератор, линия задержки на ПАВ.*

*Piddubnyi V.O., Piddubnyi V.V. **The transformers of mechanical values on surface acoustic wave.** Analyzed the structural scheme of transducers of mechanical quantities on the surface acoustic waves, we consider the scheme compensation converter mechanical values, discussed issues of improving the accuracy of measurement.*

***Keywords:** transformers of mechanical values on surface acoustic waves, differential amplifier, SAW-generator, delay line SAW.*