УДК 681.586

ЛІНІЯ ЗАТРИМКИ НА ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЯХ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН

Піддубний В.О., Лопушенко В.К., Піддубний В.В.

Прилади на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) завойовують позиції, де раніше використовувались традиційні рішенняСеред іншого це стосується генераторів кодивань. Генератори коливань на ПАХ [1,2] мають високу стабільність частоти, низьку температурну чутливість, перекривають діапазон частот від одиниць МГц до декількох ГГц, а головне те, що в них механічна деформація матеріалу, з якого виготовлений звукопровід, пов'язана зі зміною частоти генерації [3]. Тому ПАХ генератори все частіше використовують для створення перетворювачів механічних величин (ПМВ) в електричний частотний сигнал.

Перетворювач механічних величин складається з двох частин: первинного (ПП) та вторинного (ВП) перетворювачів. ПП – це пружний чутливий елемент (ЧЕ) відповідного конструктивного виконання (консольний чи мембранний) [4,5], напружено-деформований стан якого залежить від величини вимірюваної механічної величини (тиску, переміщення то що). ВП – це лінії затримки (ЛЗ) на ПАХ, розміщені на поверхні ПП, та електронна схема, яка забезпечує обробку сигналу. ВП будується за диференційною схемою, яка складається з двох ПАХ генераторів, що перетворюють напружено-деформований стан ЧЕ в високочастотний сигнал, та змішувача, який переносить інформацію про механічний вплив в низькочастотну частину діапазону зручну для обробки вимірювальними засобами. Всі ПМВ мають в своєму складі ЛЗ, розміщені на деформованій поверхні ЧЕ, параметри яких, здебільшо, і визначають метрологічні характеристики.

Зв'язок метрологічних характеристик ПМВ з параметрами ЛЗ

ЛЗ вмикається в коло позитивного зворотного зв'язку високочастотного підсилювача (ВЧП), що створює ПАХ генератор, частота якого пропорційна величині вимірюваного параметру. Частота генератора зв'язана з параметрами ЧЕ та ВЧП: $d\omega(X_i)/d\omega_{\text{O}} = S_X \varepsilon(X_i) + d\omega(T)/\omega_{\text{O}} + d\omega(\omega_{\text{e}})/\omega_{\text{O}}$, де S_X - коефіцієнт деформаційної чутливості датчика на ПАХ; $\varepsilon(X_i)$ – відносна деформація ЧЕ під дією механічного параметру X_i, який впливає на стан чутливого елементу; $d\omega(T)/\omega_{\text{O}}$ - температурний дрейф частоти ПАХ генератора, $d\omega(\omega_e)/\omega_{\text{O}}$ - нестабільність частоти, яка визнається флуктуаціями фазових набігів в електричних колах ВЧП φ_e. Температурний дрейф $d\omega(T)/\omega_{\text{O}} = S_{T1}\Delta T + S_{T2}\Delta T^2 + S_{T3}\Delta T^3$ [4], де S_{T1}, S_{T2}, S_{T3} – коефіцієнти температурної чутливості ПАХ генератора, ΔT – зміна температури навколишнього середовища.

Значення коефіцієнтів S_X, S_{T1}, S_{T2} та S_{T3} для основних матеріалів, з яких виготовляються ЧЕ ПМВ, наводяться в табл. 1.

Таблиця 1

Матеріал чутливого елементу	S_X	$S_{T1}\cdot10^5$, 1/°C	$S_{T2}\cdot10^5$, 1/°C	$S_{T3}\cdot10^5$, 1/°C
Y – зріз α кварцу	-0,90	2,80	0	0
ST – зріз α кварцу	-1,44	0	-1,25	0
AT – зріз α кварцу	-1,10	0	0	0,40
$ZnO - SiO_2$ плавлений	1,85	5,0	0	0

Метрологічні характеристики:

- девіація вихідної частоти - $\Delta f_{0\max} = S_X \varepsilon(X_{i\max})\omega_0$,
- масштабний коефіцієнт - $K_X = S_X \varepsilon_{\max}(X_{i\max})\omega_0 / \Delta X_{i\max}$,
- порогова чутливість - $B = 10K_X\omega_0\delta_K$,
- динамічний діапазон - $D = X_{i\max}/X_{i\min} = S_X\varepsilon_{\max}(X_{i\max})/(1...10)\delta_K$ [5],

де $X_{i\max}$ – верхняя межа вимірюваного параметру, $\varepsilon_{\max}(X_{i\max})$ – гранично допустима деформація ЧЕ, $\Delta X_{i\max}$ – максимальний діапазон виміру параметру X_i, δ_K – короткочасова нестабільність ПАХ генератора, пов'язані з міцністю, діапазоном лінійних деформацій ЧЕ та нестабільністю частоти ПАХ генератора $\delta_K = \Delta\omega/\omega_0 = \Delta f/f_0 = \Delta\delta_e/2Q$. Нестабільність залежить від добротності резонансної системи автогенератора (ЛЗ на ПАХ) Q та флуктуацій фазових набігів в активній частині генератора $\Delta\varphi_e$.

Добротність ЛЗ на ПАХ $Q = \pi M = 0{,}5\tau\omega_0$, визначається відносною акустичною довжиною ЛЗ $M = f_0\cdot\tau = f_0\cdot L/V$, де τ – час затримки сигналу в ЛЗ, L – відстань між зустрічно-штировими перетворювачами ЛЗ, V – швидкість розповсюдження поверхневої акустичної хвилі в матеріалі ЧЕ. Необхідне значення M та висока лінійність ФЧХ в смузі частот, які генеруються, забезпечуються топологією ЛЗ на ПАХ.

Вибір топології ЛЗ та її розрахунок

Для визначення вимог до топології ЛЗ розглянемо основні її характеристики. Нехай ЛЗ складається з двох зустрічно-штирових перетворювачів (ЗШП) з різною кількістю пар електродів в кожному із них N_1, N_2. Функція передачі такої ЛЗ визначиться виразом $H_{\text{ЛЗ}}(\omega) = K\cdot H_1(\omega)\cdot H_1(\omega)$, де K – коефіцієнт передачі ЛЗ, $H_1(\omega)$ – АЧХ вхідного ЗШП, $H_2(\omega)$ - АЧХ вихідного ЗШП. Для неаподізованих, еквідістантних ЗШП - $H_1(\omega) = \sin(x_1)/x_1$, $H_1(\omega) = \sin(x_2)/x_2$, де $x_1 = \pi\cdot N_1(f - f_0)/f_0$, $x_2 = \pi\cdot N_2(f - f_0)/f_0$, N_1, N_2 – числа пар електродів в ЗПШ.

Розглядаючи ЛЗ як елемент, що вносить запізнення τ в передачу сигналу з вхідного до вихідного ЗШП, можна записати його фазочастотну характеристику $\varphi_{\text{ЛЗ}}(\omega) = \omega\tau$. Тоді рівняння балансу фаз $\varphi_{\text{ЛЗ}}(\omega)+\varphi_e(\omega)=2\pi n$ ПАХ

генератора прийме вигляд $\omega\tau+\varphi_e(\omega)=2\pi n$. Звідки знаходимо набір можливих частот коливань в замкненому контурі ЛЗ-ВЧП $\omega_n = (2\pi n - \varphi_e)/\tau$. Таким чином спектр коливань ПАХ генератора є лінійчатим. Віддаль між сусідніми спектральними лініями постійна і дорівнює $\Delta\omega = \omega_n - \omega_{n-1} = 1/\tau = V/L$. Для забезпечення однозначної залежності вихідної частоти від величині вимірюваного параметру необхідно підтримувати незатухаючі коливання лише на одній частоті. Це досягається селективністю ЛЗ, яку проектують так, щоб задовольнити систему нерівностей $KK_{\text{ВЧП}}H_1(\omega)H_2(\omega) \geq 1,\ \omega = \omega_n;\ \ KK_{\text{ВЧП}}H_1(\omega)H_2(\omega) < 1,\ \omega \leq \omega_{n-1}, \omega \geq \omega_{n+1}$. Одночасне виконання цих нерівностей визначає одномодовість роботи ПАХ генератора. При цьому кількість пар електродів в одному з ЗШП (вузькосмуговому) повинна бути $N_{\text{в}} = L/\lambda_0 = \omega_n L/2\pi V$, де λ_0 – довжина поверхневої акустичної хвилі на акустичного синхронізму ЛЗ.

Таким чином однією з вимог до топології ЛЗ є рівність довжини одного із ЗШП (вузькосмугового) акустичній довжині ЛЗ. В цьому випадку генерується лише одна частота ω_n, а всі останні можливі частоти генерації знаходяться в областях нульового коефіцієнту передачі ЛЗ. Для компенсації фазових набігів, що вносяться ВЧП та узгоджувальними ланцюгами, необхідно скоректувати довжину акустичного шляху L на $\Delta L = (-\pi + \varphi_e)V/\omega_n$. Така корекція дозволяє точно встановити значення частоти генерації.

Кількість пар електродів в вузькосмуговому ЗШП пов'язана з добротністю коливальної системи Q та визначається заданим динамічним діапазоном $D = \Delta f_{\max}/\Delta f_{\min}$. Зважаючи на те, що $\Delta f_{\max} = f_0 S_X \varepsilon_{\max}(X_{i\max})$ а $\Delta f_{\min} \geq \delta_K f_0$, то, знаючи D, можна знайти добротність ЛЗ $Q = D\Delta\varphi_e / S_X \varepsilon_{\max}(X_{i\max})$, кількість пар електродів в вузькосмуговому ЗШП $N_в = Q/\pi$ та відносну акустичну довжину ЛЗ $M = N_в$.

Робоча частота та смуга пропускання вузькосмугового ЗШП лінії затримки відповідно дорівнюють: $f_0 = V/\lambda_0 = V/2d$, $\Delta f_в = f_0/N_в$, де d – крок електродів ЗШП, $d = 2a$, a - ширина електродів. Мінімальне значення апертури ЗШП з урахуванням дифракційних спотворень акустичних потоків при розповсюдженні ПАХ визначається з умови $W_{\min} = V\sqrt{\tau/f_0} = V\sqrt{L/Vf_0}$, де $\tau = L/V$ – час затримки сигналу в ЛЗ.

Змінюючи величину апертури перетворювачів ПАХ в межах $W \geq W_{\min}$ можна варіювати опором випромінювання R_a, забезпечуючи узгодження опорів ЗШП ЛЗ та вхідного чи вихідного опорів ВЧП. Значення опору може бути розраховане за формулою $R_a = 4k^2/(Wf_0C_{EF}N)$, де C_{EF} – погонна ємність пари електродів, N - число пар електродів ЗШП. Статична ємність перетворювача визначається, як $C_n = C_{EF}NW$, та лежить в межах 5...20 пФ.

Для зменшення впливу статичної ємності C_n використовують компенсуючу індуктивність, що включається послідовно чи паралельно із ЗШП. Утворений коливальний контур повинен мати власну резонансну частоту близьку до частоти акустичного синхронізму. Однак при зменшенні затухань в коливальній системі „ЗШП - компенсуюча індуктивність", як правило, погіршується довгочасова стабільність автогенератора за рахунок впливу нестабільностей елементів узгодження. Це для ПАХ генератора ПМВ недопустимо. Відмова від компенсуючих індуктивностей супроводжується збільшенням втрат в ЛЗ, які можна розрахувати відповідно до [5], що призводить до необхідності використання в активній частині ПАХ генератора ВЧП з більшим коефіцієнтом підсилення.

Для перетворення напружено-деформованого стану ЧЕ в електричний сигнал на його поверхні сформовано дві лінії затримки на ПАХ. Одна із них розміщена в зоні максимальної деформації а друга в зоні деформації зворотного знаку. Лінії затримки однакові по конструкції і складаються з трьох ЗШП: вузькосмугового, широкосмугового та акустичної розв'язки. Для зменшення паразитного відбиття ПАХ від сусідніх електродів використане їх розщеплення. Параметри ліній затримки наведені в табл.2.

Таблиця 2

Параметр	Один. виміру	Значення
Частота акустичного синхронізму	МГц	78,85
Смуга пропускання по рівню 0 дБ	кГц	490
Втрати в ЛЗ	дБ	12...14
Форма АЧХ ЗШП	$\sin(x)/x, x = \pi \cdot N(f - f_0)/f_0$	
Подавлення бокових пелюсток АЧХ ЛЗ	дБ	13...18
Тип ЗШП	Неаподізовані, еквідістантні з розщепленими електродами	
Кількість електродів вузькосмугового ЗШП	пар електродів	160
Активна складова R_a вузькосмугового ЗШП	Ом	420
Статична ємність C_n вузькосмугового ЗШП	пФ	20
Кількість електродів широкосмугового ЗШП	пар електродів	80
Активна складова R_a широкосмугового ЗШП та ЗШП акустичної розв'язки	Ом	840
Статична ємність C_n широкосмугового ЗШП та ЗШП акустичної розв'язки	пФ	10
Довжина ПАХ λ_0	мкм	40
Відстань електрод/проміжок	мкм	5
Апертура	мкм	2500
Відстань між центрами ЗШП для ЛЗ1	мкм	6413
Відстань між центрами ЗШП для ЛЗ2	мкм	6415

Для забезпечення генерації на різних частотах з рознесенням в 50 кГц ЛЗ1 та ЛЗ2 мають різні фазові набіги, які визначаються різницею в 2 мкм між центрами ЗШП. Частоти генерації складають 78,85 та 78,90 МГц.

Результати експериментальних досліджень

ЛЗ виготовлялася стандартними методами органічної фотолітографії на мембрані з п'єзоелектричного кварцу *ST*-зрізу та випробовувалася в складі ПАХ датчика, побудованого по диференційній схемі аналогічно [6]. Застосування таких ЛЗ забезпечує високу стабільність частоти генерації (короткочасова нестабільність частоти менше ±1 Гц за секунду, середньочасова — ±10 Гц за годину) кожного із автогенераторів та лінійність перестроювання частот генерації, під дією вимірюваного механічного параметру, в діапазоні ±25 кГц від значення базової частоти ПМВ 50 кГц.

Таким чином отримано математичні вирази, які дозволяють по заданим метрологічним характеристикам спроектувати, розрахувати топологію та електричні параметри ліній затримки на ПАХ для перетворювачів механічних величин в електричний частотний сигнал, які з успіхом можуть використовуватися для створення високоточних вимірювальних приладів механічних величин.

Література

1. Дворников А.А., Огурцов В.И., Уткин Г.М.Стабильные генераторы на поверхностных акустических волнах. — М.: Радио и свіязь. — 1983. — 136 с.

2. Речицкий В.И. Акустоэлектронные радиокомпоненты / Речицкий В.И. — М.: Радио и связь. — 1987. — 192 с.

3. Деформационные, температурне и гироскопические эффекты в автогенераторах на ПАВ / М.А. Павловський, В.К. Лопушенко, Н.Г. Черняк, Н.Г.Кондратенко // Механика гироскопических систем. – 1989. – № 9. – С 50-56.

4. Черняк Н.Г. Акустоелектронні низькочастотні лінійні акселерометри для систем управління рухомих об'єктів // Механіка гіроскопічних систем. – 2008. – №.19. – С 116-124

5. Піддубний В.О., Лопушенко В.К., Піддубний В.В. Генератор на поверхневих акустичних хвилях для перетворювачів механічних величин // Механіка гіроскопічних систем. – 2008. – №19. – С 104-116.

6. Піддубний В.О. Вимірювальні перетворювачі рідини та газу // Інформатизація та нові технології. – 1995. - №2. – С.14-16.

Піддубний В.О., Лопушенко В.К., Піддубний В.В. ***Лінія затримки на поверхневих акустичних хвилях для перетворювачів механічних величин****. Наведені результати досліджень деформаційної та температурної чутливостей лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях.*

Ключові слова: *лінія затримки, поверхневі акустичні хвилі*

Поддубный В.А., Лопушенко В.К., Поддубный В.В. ***Линия задержки на поверхностных акустических волнах для преобразователей механических величин****. Приведены результаты исследований деформационной ы температурной чувствительностей линии задержки на поверхностных акустических волнах.*

Ключевые слова: линия задержки, поверхностные акустические волны

Poddubny V.A., Lopushenko V. K., Poddubny V.V. ***The Delay Line Surface Acoustics Waves For Mechanical Value Transfjrmer****. The results of the deformation and temperature sensitivity of the delay line on surface acoustic wave are given.*

Key words: *the delay line, surface acoustic wave*