

ДЕФОРМАЦІЙНО-ЧУТЛИВИЙ ПАХ ГЕНЕРАТОР

Піддубний В.О., Піддубний В.В.

Розглянуті питання деформаційної та температурної чутливостей генераторів на поверхневих акустичних хвилях. Приведено опис та результати досліджень.

Вступ

Прилади на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) все більше завоюють позиції, які раніше твердо були зайняті традиційними пристроями радіоелектронної апаратури. До таких пристроїв можна віднести генератори на ПАХ. [1,2] Вони мають високу стабільність частоти, достатньо низьку температурну чутливість, можуть працювати в діапазонах частот від одиниць МГц до одиниць ГГц. ПАХ генератори технологічні, активна та пасивна їх частини виготовляються в єдиному технологічному циклі на єдиній основі. Вони все частіше використовуються для створення приладів вимірювання електричним способом механічних величин (ПАХ датчики), таких як сила, механічне переміщення, тиск, прискорення, т.ін. [2 - 4]

Постановка задачі

Використання ПАХ генераторів в пристроях вимірювання механічних величин має свої особливості, до яких слід віднести

- деформаційну та температурну чутливості фазового зсуву в чутливому елементі, співвідношення яких в значній мірі визначає точність вимірювання механічних параметрів;

- частотний вихід та можливість побудови датчиків по диференційній схемі: ПАХ датчики мають п'єзоелектричний чутливий елемент, на поверхні якого нанесені дві лінії затримки (ЛЗ) на ПАХ, причому одна з них розміщена в зоні додатної, а інша – від'ємної деформації; ЛЗ підключені до високочастотних підсилювачів, утворюючи два ПАХ генератори, які працюють на близьких частотах і знаходяться в одному корпусі в безпосередній близькості один від одного, що приводить до суттєвого впливу одного генератора на інший.

Урахування цих особливостей роботи деформаційно-чутливих ПАХ генераторів дозволяє в значній мірі поліпшити характеристики точності ПАХ датчиків.

Теоретичні викладки

В складі ПАХ датчика можна виділити такі основні вузли, як два функціональних перетворювача та змішувач.

Функціональний перетворювач (ФП) – це пристрій призначений для перетворення механічного параметру (деформації чутливого елемента) в електричний частотний сигнал. ФП складається з двох перетворювачів: первинного (ПП) та вторинного (ВП). ПП – це пружний чутливий елемент (ЧЕ) відповідного конструктивного виконання, напружено-деформований стан якого залежить від значення вимірюваної величини. ВП – це ЛЗ на ПАХ, виготовлена на поверхні ЧЕ та призначена для вимірювання осередненого по довжині ЛЗ напружено-деформованого стану ЧЕ в кожний момент часу. ЛЗ ввімкнено в коло позитивного зворотного зв'язку високочастотного підсилювача. Таке ввімкнення створює ПАХ генератор. ВП перетворює напружено-деформований стан ПП в електричний сигнал, частота якого пропорційна величині вимірюваного параметру.

Вихідний частотний сигнал ПАХ датчика знімається зі змішувача, на якому виділяється різницева частота, що лежить в межах від 1 до 100 кГц

$$\omega(X_i) = \omega_1(X_i) - \omega_2(X_i),$$

де $\omega_1(X_i)$ та $\omega_2(X_i)$ - вихідні частоти першого та другого ФП; X_i – механічний параметр, що впливає на стан чутливого елемента.

ФП генерує на частоті, на якій виконується баланс фаз

$$\varphi_{ЛЗ}(X_i) + \varphi_E(X_i) = 2\pi n, \tag{1}$$

де $\varphi_{ЛЗ}(X_i)$ та $\varphi_E(X_i)$ - фазові набіги відповідно в ЛЗ та електричних колах підсилювача, n – ціле число.

При цьому

$$\varphi_{ЛЗ}(X_i) = \tau(X_i) \omega_n(X_i),$$

де $\omega_n(X_i)$ – частота генерації ВП, $\tau(X_i)$ – час затримки в ЛЗ, який пов'язаний з акустичною довжиною ЛЗ та швидкістю розповсюдження ПАХ.

Час затримки в ЛЗ, пов'язаний з акустичною довжиною ЛЗ та швидкістю розповсюдження ПАХ, визначається як

$$\tau(X_i) = L(X_i) / V(X_i).$$

Шляхом нескладних перетворень з рівняння (1) знаходимо відносну зміну частоти генератора

$$\omega(X_i) / \omega_1 = V(X_i) / V_0 - L(X_i) / L(L_0) - (1/2\pi n) \Delta\varphi_e / \varphi_e$$

де ω_1 – частота генератора при відсутності механічного впливу;

$V(X_i) / V_0$, $L(X_i) / L(L_0)$, $\Delta\varphi_e / \varphi_e$ – відносні зміни швидкості розповсюдження ПАХ, акустичної довжини ЛЗ та фазового набігу в електронних колах підсилювача.

Враховуючи, що швидкість V розповсюдження ПАХ пов'язана з інтегральним модулем поверхневої пружності E та густиною поверхневого шару ρ ЧЕ залежністю $V^2 = E/\rho$, можна записати

$$dV / V_0 = dE / 2E - d\rho / \rho. \tag{2}$$

З (2) видно, що для зміни швидкості ПАХ необхідна зміна густини поверхневого шару матеріалу ЧЕ та наявність нелінійних ефектів. Навіть при роботі ЧЕ далеко від пластичних деформацій модулі пружності в деформованому стані залежать від деформації. Це пов'язано з нелінійністю узгальненого закону Гука (так звана фізична нелінійність матеріалу).

$$E = E_0 + K\varepsilon,$$

де E, E_0 – модулі Юнга в деформованому та недеформованому станах; ε – відносна лінійна деформація поверхневого шару в напрямку розповсюдження ПАХ, K – коефіцієнт фізичної нелінійності матеріалу ЧЕ.

Тоді з (1) маємо

$$d\omega(X_i)/\omega = S_X \varepsilon(X_i) + \alpha_T S_T + d\varphi_e/\varphi_e,$$

де S_X та S_T – коефіцієнти деформаційної та теплової чутливостей перетворювача; α_T – температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу ЧЕ.

Коефіцієнти S_X та S_T пов'язані з коефіцієнтом фізичної нелінійності

$$S_X = K/(2V^2\rho) + (1 - 2\mu)/2 - 1, \quad S_T = K/(2V^2\rho) + 1/2,$$

де μ – коефіцієнт Пуассона матеріалу чутливого елемента.

Коефіцієнти фізичної нелінійності різні для різних матеріалів:

для кварцу – ST -зрізу $K_{ST} = -1,9 \cdot 10^{10}$ кг/с²м,

для плавленого кварцу $K = 11,16 \cdot 10^{10}$ кг/с²м.

Вихідна частота перетворювача з урахуванням незначного впливу механічних переміщень на фазові набіги в підсилювачі визначається, як

$$\omega(X_i) = \omega_0 + S_X \varepsilon(X_i) (\omega_{01} - \omega_{02}) + S_T \alpha_T \omega_0,$$

де $\omega_0; \omega_{01}; \omega_{02}$ – вихідні частоти ПАХ датчика, ФП1 та ФП2 при відсутності деформації, $\varepsilon(X_i)$ – відносна деформація чутливого елемента.

Для консольного закріплення ЧЕ балочного типу його відносна деформація ε під дією сили F пов'язана з геометричними розмірами та механічними параметрами виразом

$$\varepsilon(F) = 3F((l - l_1)^2 - (l - l_1 - L)^2)/(E_0 L b h^2),$$

де l, b, h – довжина, ширина та товщина консольно закріпленої балки; l_1 – відстань від місця закріплення до середини найближчого зустрічно-штирьового перетворювача (ЗШП) лінії затримки на ПАХ, нанесеної на поверхню ЧЕ.

Фазові шуми підсилювача $\Delta\varphi_e/\varphi_e$ визначають короткочасну стабільність частоти ФП

$$\Delta\omega/\omega_0 = (\Delta\varphi_e/\varphi_e)/(2\pi M)$$

де M – відносна акустична довжина ЛЗ.

Дрейф вихідної частоти визначається рівнем паразитних зв'язків між ПАХ генераторами, які працюють на близьких частотах. При розносі час-

тот на 100 кГц при частотах генерації 70...80 МГц паразитні зв'язки здійснюються через загальні кола живлення, сигнальні дроти та спільне електромагнітне поле.

Принцип побудови та схемно-конструкторські особливості

ПАХ датчик, побудований по диференційній схемі і виготовлений як моноблок, в корпусі якого знаходиться ЧЕ консольного типу розмірами 30x5x0,5 мм, виготовлений з кварцу – *ST*-зрізу, та електронна схема із чотирьох гібридних інтегральних схем (ГІС) (два трьох каскадних ВЧ підсилювача типу СЕ-СЕ-СК, де СЕ та СК схеми підсилювального каскаду на біполярних транзисторах зі спільним емітером та колектором, змішувач, виконаний по диференційній схемі, та вихідний каскад, зібраний по схемі ОП-СК, де ОП – схема на операційному підсилювачі), розроблених в МНДІ ПМ “Ритм” [5]. ЛЗ мають по два ЗШП - ширококутний (40 пар електродів) та вузькокутний (8 секцій по 20 електродів, що еквівалентно 300 парам електродів). Вони працюють на частотах близьких до 80 МГц. Активними елементами ГІС є транзистори типу 2Т3106А2, 2Т308А2, мікросхеми типу 129 НТ1А1, 140УД12, які розміщені на ситаловій основі СТ50-1 в корпусі типу 151.15-1. Чутливий елемент розміщений в спеціально розробленому металевому корпусі, виконаному із сталі 36НХТЮ, який працює як електромагнітний екран та забезпечує розв'язку між полями ФП не гірше 36 дБ. Розв'язка по колам живлення здійснюється за допомогою пасивних LC та RC фільтрів, причому частото задаючі каскади генераторів розв'язані LC фільтрами, а буферні – за допомогою RC кіл, що забезпечує розв'язку не гіршу 45 дБ. Розв'язка по сигнальним дротам в значній мірі залежить від змішувача. При безпосередньому змішуванні сигналів на базі нелінійного елемента розв'язка складає близько 6 дБ, при використанні буферних каскадів – 15...18 дБ, диференційного – близько 40 дБ.

Результати експерименту

Параметри ФП та ПАХ датчика в цілому вимірювалися на установці, що складається з прийомного вузла, який перетворює тиск повітря (від 0 до 160 кПа) в лінійне переміщення штока (хід штока 0,398 мм), вимірювача частоти типу ЧЗ-35, джерела живлення типу Б5-47 та задатчика тиску типу МПА-15. Контроль тиску здійснювався зразковим манометром класу 0,15. Приймальний вузол та ФП або ПАХ датчик знаходилися в камері тепла та холоду типу МС-81 з робочим діапазоном температур –80...+120 °С. Температурна нестабільність визначалася в діапазоні температур від мінус 30 до плюс 60 °С.

Результати досліджень датчика механічних величин (тиску) на поверхневих акустичних хвилях наведені в таблиці.

Таблиця

№ пп	Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
1	Діапазон вимірюваного тиску	кПа	0...160
2	Вихідна частота	кГц	110
3	Максимальна девіація вихідної частоти	кГц	50
4	Масштабний коефіцієнт	Гц/кПа	312
4	Вихідна частота ФП1	кГц	78830
5	Вихідна частота ФП2	кГц	78720
6	Нелінійність характеристики	%	0,1
7	Короткочасна стабільність вихідної частоти	од. за 1 с	0,9 10
8	Температурна нестабільність, приведена до верхньої межі вимірювання	%	1,5

Висновки

Використання математичної моделі, що пов'язує частоту вихідного сигналу деформаційно-чутливого ПАХ генератора з геометричними розмірами ЧЕ, ЛЗ та фізичними параметрами п'єзоелектричного матеріалу, схемотехнічних та конструктивних рішень як електронної частини так и ФП в цілому дозволяють створювати датчики механічних величин на ПАХ класу 1,0 та вище.

Література

1. Дворников А.А., Огурцов В.И. Уткин Г.М. Стабильные генераторы на поверхностных акустических волнах. - М.: Радио и связь, 1983.-136 с.
2. Речицкий В.И. Акустоэлектронные радиокомпоненты. - М.: Радио и связь, 1987. - 192 с.
3. Піддубний В.О. Вимірювальні перетворювачі тиску рідині та газу.// Інформатизація та нові технології. – 1995. - №2. – с. 14 - 16.
4. Башкатов Р.С., Гурбик В.В., Соколов С.В., Тептюк С.В. Разработка и исследование датчиков давления на ПАВ.// Материалы конф. «Акустоэлектронные устройства обработки информации». – Черкассы, 1990.
5. Поддубный В.А., Михацкий А.Ю., Башкатов Р.С. Измерительный преобразователь на основе дифференциальных каскадов.// Механика гироскопических систем. – 1994 - № 13. – с. 117 - 120.

<p>В.А.Поддубный, В.В.Поддубный Деформационно-чувствительный ПАВ генератор Рассмотрены вопросы деформационной и температурной чувствительности генераторов на поверхностных акустических волнах. Приведено описание и результаты исследований.</p>	<p>V.A.Poddubny, V.V.Poddubny Deformation-sensitive SAW generator The article deals with the issues of deformational and heat sensitivity of the generators on the surface acoustic waves. Description and results of research are shown.</p>
---	--

Надійшла до редакції 20 квітня 2006 року