

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА РАДІОВИМІРЮВАНЬ

УДК 681.586.5; 531.768

ОБЛІК ДЕЯКИХ ОБМЕЖЕНЬ ПОРОГОВОЇ ЧУТЛИВОСТІ І ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ В ІМПУЛЬСНИХ ВОЛОКОННО- ОПТИЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРАХ

Чубарєв О.А., Дем'яненко П.О

Розглянуто вплив природних факторів, які можуть обмежувати метрологічні можливості прецизійного цифрового акселерометра на основі імпульсного волоконно-оптичного давача.

Представлені в [1] технічні характеристики мають дещо ідеалізований характер, що пояснюється спрощеннями та припущеннями при кількісній оцінці метрологічних можливостей цифрового акселерометра. В даній роботі розглянуто вплив природних обмежень граничної чутливості та мінімально досяжної похибки вимірювання, обумовлених тепловими ефектами та скінченою величиною добротності маятникової коливальної системи - основи чутливого елемента-модулятора (ЧЕМ). Це дає можливість спрогнозувати величини похибок і вжити необхідних заходів.

Із-за теплового контакту ЧЕМ з навколишнім середовищем, атоми, з яких він складається, перебувають в безперервному хаотичному тепловому коливальному русі. Розглядаючи ЧЕМ як сукупність атомів, що описуються статистичними законами, можна говорити про середню величину його теплової енергії, флуктуації якої накладаються на загальну величину його механічної енергії. Виходячи із закону про рівний розподіл енергії за ступенями свободи, і приймаючи число вимірів ступенів свободи ЧЕМ, таким що дорівнює 2 (кінетична і потенціальна енергії). Вважаємо, що величина невизначеності повної енергії ЧЕМ дорівнює $k\Theta$ (k - стала Больцмана, Θ – абсолютна температура), чим і обумовлюється нестабільність його коливань. Кінетична енергія маятника ЧЕМ може бути представленою як $W = W_m + W_l$, де W_m – кінетична енергія інерційної маси m , яка зосереджена на кінці маятника ЧЕМ; W_l – кінетична енергія консолі волоконного світловода (ВС), що служить пружним підвісом маятника. Вважаючи що інерційна маса – це матеріальна точка, величину W_m можна записати у вигляді:

$$W_m = 2\pi^2 \frac{mR^2}{T^2} \quad (1)$$

де R – радіус кола обертання кінця маятника; T – період обертання маятника. Величина W_l визначиться шляхом інтегрування по довжині консолі вивази, що приведений нижче (див. рис.1)

$$dW_l = 2\pi^2 \frac{\tau r^2}{T^2} dl \quad (2)$$

де dW_l - кінетична енергія елемента довжини консолі dl ; τ – погонна (кг/м)

маса консолі ВС; r – радіус кола обертання елемента dl . Нехтуючи викривленням консолі, величину r з поточною довжиною інтегрування l можна зв'язати виразом $r = R \frac{l}{L}$, (де L - повна довжина консолі ВС), звідки:

$dl = \frac{L}{R} dr$. З урахуванням цього, результатом інтегрування (2) буде:

$$W_l = \frac{2}{3} \pi^2 \tau \frac{R^2}{T^2} L \quad (3)$$

Підсумовуючи (1) та (3), отримаємо:

$$W = 2\pi^2 \frac{R^2}{T^2} m^* \quad (4)$$

де $m^* = m + \frac{\tau L}{3}$.

Нестабільність періоду обертання маятника ЧЕМ визначимо як: $\delta T_1 = \frac{\Delta T}{T} = \frac{|T - T'|}{T}$, де T' – період обертання маятника ЧЕМ, що відповідає підвищеній (зменшеній) на $k\Theta$ (за рахунок теплових флуктуацій) його енергії. Визначивши з (4) T і T' та враховуючи, що $k\Theta \ll W$, отримаємо:

$\delta T_1 = \frac{k\Theta}{2W}$. Підставивши сюди числові дані ($\Theta =$

300 К , $T = 1 \text{ с}$, $R = 2 \text{ мм}$, $m^* = 10^{-3} \text{ кг}$) [1], знайдемо, що $\delta T_1 \cong 5 \cdot 10^{-14}$, з чого робимо висновок, що теплові флуктуації енергії ЧЕМ суттєво не вплинуть на метрологічні можливості акселерометра.

Більш сильного впливу на точність вимірювання надасть температурна залежність параметрів маятника ЧЕМ, у першу чергу, зміна його довжини із-за теплового подовження. Дамо оцінку величині цього фактора. Виходячи з виразу для періоду маятника $T = 2\pi \sqrt{\frac{mL^3}{3El}}$ [1] (тут E – модуль Юнга

матеріалу підвісу (кварцу); $I = \pi d^4 / 64$ – момент інерції поперечного зрізу ВС; d – діаметр ВС), запишемо вираз для оцінки температурної похибки періоду обертання: $\delta T_2 = \frac{\Delta T}{T} = \frac{3}{2} \frac{\Delta L}{L} + \frac{1}{2} \frac{\Delta E}{E} + \frac{1}{2} \frac{\Delta I}{I} = (7\alpha_l + 7\alpha_E) \frac{\Delta \Theta}{2}$, де α_l ,

α_E – температурні коефіцієнти теплового розширення кварцу та модуля Юнга, відповідно; $\Delta \Theta$ – ширина робочого діапазону температур ВОД. Підстановка чисельних значень ($\alpha_l = \alpha_E = 1 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$; $\Delta \Theta = 100 \text{ К}$) дає: $\delta T_2 \cong 10^{-5}$.

Отримана величина δT_2 більш суттєва, звідки, на перший погляд, вини-

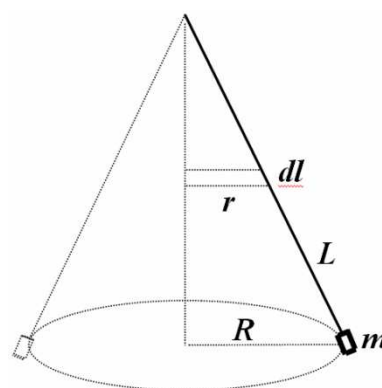


Рис.1

кає загроза перекреслення всіх отриманих оцінок [1]. Одначе, як вказувалось в [3], гнучкість обробки результатів вимірювань за допомогою комп'ютерної техніки дозволяє легко ввести в її алгоритм програму відповідної температурної корекції. Для цього акселерометр необхідно оснастити високоточним вимірювачем температури (наприклад, термопарним, а якщо необхідна більш висока точність - волоконно-оптичним, на основі ВОД температури того ж класу, що і розглядааний ВОД прискорень).

Ще одним обмеженням метрологічних можливостей розгляданого акселерометра, є нестабільність періоду обертання маятника ЧЕМ, як будь-якого автогенератора, побудованого на основі коливальної системи зі скінченною величиною добротності Q .

Оцінимо вплив цього чинника. За визначенням $Q=2\pi W/\Delta W$, де W – енергія в системі на деякий момент часу t ; ΔW – втрати енергії системою за час, рівний тривалості періоду коливань, відрахований з моменту часу t . З іншого боку, для характеристики селективних властивостей коливальної системи, використовується ще одна формула: $Q=\omega_0/2\Delta\omega_{0,7}$, де ω_0 - частота власних коливань системи; $\Delta\omega_{0,7}$ - відхилення зовнішньої збуджуючої частоти від частоти власних коливань системи, при якому енергія коливань системи зменшується вдвічі. Легко бачити, що друга формула нам не годиться, оскільки у разі автоколивальної системи частота її збудження (живлення системи зовнішньою енергією) задається власною частотою коливань системи. Величина флуктуації частоти системи в цьому випадку визначатиметься зменшенням енергії коливальної системи не удвічі, а тільки в $\Delta W/W$ раз (за умови підживлення системи енергією один раз за період коливань). Виходячи з цих міркувань і вважаючи, в першому наближенні, що в діапазоні змін (флуктуацій) частоти, що цікавить нас, залежність $\Delta\omega$ (ΔW) лінійна (коефіцієнт пропорційності приймемо рівним одиниці), а також враховуючи, що живлення системи енергією в нашому випадку здійснюється чотири рази за період, можна записати:

$$\delta T_3 = \frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\pi}{2Q^2} \quad (5)$$

Добротність коливальних систем на основі кристалів кварцу може досягати величин порядку 10^6 [5]. Виходячи з того, що підвіс ЧЕМ виконаний з аморфного кварцу (кварцового скла), а також зважаючи на специфіку механізмів втрат енергії (тертя в підвісі, тертя об повітря), добротність коливальної системи в нашому випадку буде, звичайно, меншою. Для забезпечення максимально можливої величини добротності маятника ЧЕМ необхідно прийняти ряд превентивних заходів. Втрати по першому з вищезазначених механізмів можна зменшити, зменшуючи кут відхилення маятника, що практично і реалізовано: при $R=2$ мм та $L=100$ мм [1], кут відхилення маятника складає $\sim 1^\circ$. Другий - можна виключити практично повністю,

розмістивши ЧЕМ (або весь ВОД) у вакуумованому об'ємі. Виходячи зі сказаного, величину добротності маятника ЧЕМ, як механічної коливальної системи, приймемо, з певною обережністю, такою, що дорівнює $\sim 10^4$. Підстановка такої величини Q в (5) дає: $\delta T_3 \cong 10^{-8}$. Отримана величина δT_3 співвимірна з величиною відношення періоду обрахункових імпульсів до періоду обертання маятника ($\frac{\tau}{T} = 2 \cdot 10^{-9}$) [1] і може спотворювати результати вимірювань прискорення поблизу порога чутливості акселерометра. Але і в цьому випадку ситуацію можна виправити. Враховуючи статистичний характер розкиду значень періоду обертання маятника відносно його центрального значення, похибка вимірювання величини прискорення може бути зменшеною при обробці сигналу ВОД шляхом опосередкування результатів вимірювань за кілька періодів обертання маятника [3]. У першому наближенні, опосередкування результатів вимірювань за 10 періодів дозволить на порядок зменшити величину δT_3 . Очевидною платою за це буде зниження швидкодії акселерометра, проте, зважаючи на повільність змін величин прискорень реальних об'єктів, небезпека "провалів" в процесі вимірювання не істотна. Вживання відповідних заходів при облаштуванні умов роботи акселерометра і відповідній обробці результатів вимірювань, вселяє надію, що високі розрахункові значення параметрів акселерометра [1] можуть бути реалізованими і в реальних умовах його експлуатації.

Література

1. Дем'яненко П.А., Зиньковский Ю.Ф., Прокофьев М.И. Прецизионный цифровой акселерометр с волоконно-оптическим датчиком. // Радиоэлектроника. Известия высш. учеб. заведений. 1997. Т.40, №1. С.39-47.
2. Дем'яненко П.А., Зиньковский Ю.Ф., Прокофьев М.И. Обработка сигналов в измерителях с импульсными волоконно-оптическими датчиками. // Радиоэлектроника. Известия высш. учеб. заведений. 1997. Т.40, №1. С.39-47.
3. Чубарев О.А., Дем'яненко П.О. Алгоритм опрацювання сигналів в прецизійному цифровому акселерометрі з волоконно-оптичним давачем//Вісник НТУУ "КПІ" Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. Вип. 35, 2007,
4. Дубіковський А.О., Дем'яненко П.О. Мікроконтролерне опрацювання сигналів в прецизійному цифровому акселерометрі з волоконно-оптичним давачем// Вісник НТУУ "КПІ" Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. Вип. 35, 2007,
5. Малогабаритная аппаратура. Справочник радиолюбителя / Терещук Р.М., Терещук К.М., Седов С.А. и др. Киев. Наукова думка. 1971. С.292.

Ключові слова: цифровий акселерометр, волоконно-оптичні датчики	
Чубарев А.А., Дем'яненко П.А. Учет некоторых ограничений пороговой чувствительности и ошибки измерений в импульсных волоконно-оптических акселерометрах Рассмотрено влияние естественных факторов, ограничивающих метрологические возможности прецизионного цифрового акселерометра на основе импульсного волоконно-оптического датчика.	Chubarev A.A., Demjanenko P.A. The account of some restrictions of threshold sensitivity and mistakes of measurements in pulse optical fiber accelerometer Influence of natural factors, which can limit metrological possibilities of the precision digital accelerometer on the basis of pulse fiber-optical sensor unit, is considered.