

УДК 681.586.5; 531.768.

НЕЙТРАЛІЗАЦІЯ ВПЛИВУ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ФАКТОРІВ НА ПОХИБКИ ВИМІРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАВАЧІВ З ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ¹

*Дем'яненко П.О., к.т.н., доцент; Зінковський Ю.Ф., д.т.н., професор
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м.Київ, Україна
pdemianenko@gmail.com*

THE NEUTRALIZATION OF INFLUENCE OF DESTABILIZING FACTORS ON THE ACCURACY OF THE METER BASED ON FIBER OPTIC SENSOR WITH PULSE MODULATION

*Dem'yanenko P. O., PhD, Associate Professor;
Zinkovsky Yu. F., Doctor of Engineering, Professor
National Technical University of Ukraine «Kyiv polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

Вступ

В роботах [1-5] показано, що на основі аналогових волоконно-оптичних давачів (ВОД), використовуючи їх як вимірювальні перетворювачі, неможливо будувати прецизійні вимірювачі фізичних величин.

Причиною тому є метрологічно низька якість оптичного потоку, який в аналогових ВОД є одночасно і носієм, і реципієнтом інформації. Аналіз цієї ситуації і пошук шляхів виходу з неї привів до усвідомлення необхідності відмови від аналогових (безперервних) принципів модуляції параметрів оптичного потоку і переходу до дискретних (імпульсних) принципів модуляції. Реально це означає, що для підвищення точності вимірювань за посередництвом ВОД, необхідно в процесі модуляції оптичного потоку вводити в нього нові, додаткові до оптичних але *не оптичні*, параметри і саме на них перекладати роль реципієнтів інформації. Завдяки такому підходу, проблема точності вимірювань більше не буде пов'язаною з принципово низькоточними вимірюваннями параметрів малопотужних оптичних потоків – вона переноситься в інші, неоптичні області, де її або просто немає, або вона там є розв'язаною на належному рівні [6]. При цьому зберігаються всі притаманні волоконній оптиці переваги, оскільки носієм інформації залишається оптичний потік. Були розроблені методи і шляхи практичної реалізації цього принципу, які стали основою для створення нового класу прецизійних ВОД з імпульсною модуляцією інтенсивності потоку оптичного випромінювання (ІВОД) [7-9].

¹ <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1218>

В цих роботах проводились розрахунки очікуваних параметрів прецизійних вимірювачів на прикладі акселерометра або гравіметра, робота яких ґрунтується на використанні ІВОД. Для спрощення розрахунків робилися припущення, що параметри всіх ланок вимірювального ланцюга ІВОД є абсолютно стабільними протягом всього часу проведення вимірювань. Проведені розрахунки підтвердили вірність основних принципів, покладених в основу розробки, і показали принципову можливість побудови прецизійних вимірювачів з унікально високими метрологічними параметрами.

Разом з тим, покладені в основу розрахунків ідеалізовані припущення є джерелом постійного занепокоєння з приводу того, наскільки вплив неврахованих дестабілізуючих факторів зможе погіршити реально досяжні значення вимірюваних параметрів порівняно з їх розрахунковими значеннями. Таким чином, необхідно вміти давати адекватну оцінку впливові дестабілізуючих факторів на параметри ланок вимірювального ланцюга, якими можуть обмежуватися реальні метрологічні можливості ІВОД. Спробуємо це зробити.

Вплив температури.

Першою серед можливих причин, які можуть впливати на показники точності вимірювання, слід визнати температуру навколишнього середовища, якою визначається і температура самого ІВОД. Всі атоми, з яких складається ІВОД і, зокрема, конічний маятник, що є чутливим елементом модулятора (ЧЕМ), перебувають в безперервному хаотичному тепловому русі. Розглядаючи ЧЕМ в цілому, як ансамбль великого числа атомів, що описується 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 (їх число для конічного маятника приймемо $i = 2$ – кінетична і потенціальна енергії), величину невизначеності повної енергії ЧЕМ будемо, згідно з [10], вважати такою, що дорівнює $k\Theta$ (тут k – стала Больцмана, а Θ – абсолютна температура ЧЕМ), чим і буде визначатися відповідне значення нестабільності його коливань.

Кінетичну енергію маятника ЧЕМ можна представити як

$$W = W_m + W_l,$$

де W_m , W_l – відповідно, кінетичні енергії інертної маси m на кінці маятника та маси рухомої консолі кварцового волоконного світловоду (ВС), що слугує пружним підвісом маятника.

Вважаючи інертну масу точковою, величину W_m , можна записати у вигляді:

$$W_m = 2\pi^2 \frac{mR^2}{T^2} \tag{1}$$

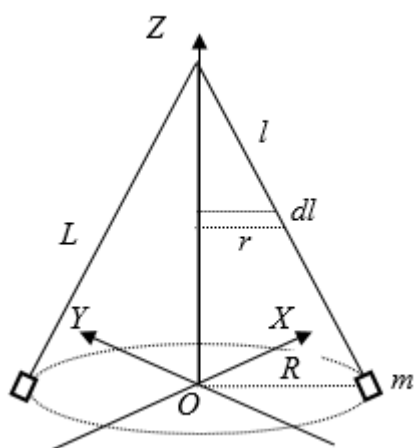


Рис.1. Кінематична схема маятникового чутливого елемента

де R – радіус кола обігу кінця маятника;
 T – період його обертання.

Величина W_l визначиться шляхом інтегрування по довжині консолі (рис.1) виразу:

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

де dW_l – кінетична енергія елемента довжини консолі dl ; τ – погонна (кг/м) маса консолі BC; r – радіус кола обертання елемента dl . Нехтуючи викривленням консолі, величину r можна виразити через поточну довжину інтегрування l :

$$r = R \frac{l}{L} \quad (\text{де } L \text{ – повна довжина консолі}),$$

звідки: $dl = L \frac{dr}{R}$. З урахуванням цього проінтегруємо (2):

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

Додаючи вирази (1) і (3), отримаємо вираз для кінетичної енергії маятника ЧЕМ:

$$W_k = 2\pi^2 \frac{R^2}{T^2} m^*,$$

де $m^* = m + \frac{\tau L}{3}$ зведена маса складових елементів кінцевого маятника.

Потенціальна енергія W_n маятника ЧЕМ визначається потенціальною енергією згину його пружного підвісу. Згідно з законом про рівний розподіл енергії за ступенями свободи, приймаємо її рівною кінетичній енергії. Тоді повна механічна енергія маятника визначиться як:

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

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 збільшеній (зменшеній) на $\frac{k\Theta}{2}$ (за рахунок теплових флуктуацій) його енергії. Записавши, користуючись формулою (4), вирази для T і T' та враховуючи, що $k\Theta \ll W$,

отримаємо:

$$\delta T_1 \cong \frac{k\Theta}{2W}.$$

Підставляючи числові дані ($\Theta = 300$ К, $T = 12,5$ с, $R = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $L = 10^{-2}$ м, $m^* = 10^{-2}$ кг) [7], знайдемо: $\delta T_1 = 10^{-4}$.

Прокоментуємо отриманий результат. Оскільки отримане значення відносної часової нестабільності δT_1 , виявилось суттєво меншим ніж мінімально можлива відносна похибка фіксації підрахункових імпульсів височастотного стабілізованого генератора ($\sim 2 \cdot 10^{-9}$ [7]), це означає, що флуктуації теплової енергії атомів маятника ЧЕМ, накладаючись на його механічну енергію, не в змозі спричинити відчутну нестабільність періоду обігу маятника.

Беручи також до уваги реальні значення добротності коливальних систем, які можуть використовуватися в схемах стабілізованих генераторів височастотних підрахункових імпульсів, а також притаманну маятникові ЧЕМ властивість таутохронності його циклів при малих кутах відхилення підвісу (а в нашому випадку, як буде показано нижче, ця умова виконується), можемо остаточно стверджувати, що прояви флуктуацій теплової енергії ансамблю атомів, з яких складається ЧЕМ, є настільки нехтовно малими, що не зможуть відчутно вплинути на метрологічні можливості вимірювачів на основі ІВОД.

Помітніший вплив на точність вимірювань може дати температурна залежність параметрів маятника ЧЕМ. В першу чергу, це стосується зміни довжини маятника із-за його теплового подовження.

Із виразу для періоду обертання маятника: $T = 2\pi \sqrt{\frac{mL^3}{3EI}}$ [7] (тут E – мо-

дуль Юнга матеріалу підвісу маятника (кварцу); $I = \frac{\pi d^4}{64}$ – момент інерції

поперечного перерізу ВС; d – діаметр ВС), отримаємо вираз для оцінки температурної похибки періоду обертання маятника:

$$\delta T_2 = \frac{\Delta T}{T} = \frac{3}{2} \frac{\Delta L}{L} + \frac{1}{2} \frac{\Delta E}{E} + \frac{1}{2} \frac{\Delta I}{I} = (7\alpha_l + \alpha_E) \frac{\Delta\Theta}{2}, \quad (5)$$

де α_l і α_E – температурні коефіцієнти розширення кварцу и модуля Юнга, відповідно; $\Delta\Theta$ – робочий діапазон температур ІВОД. Підставляючи в (5) числові значення величин ($\alpha_l \approx \alpha_E \approx 1 \cdot 10^{-7}$ К⁻¹; $\Delta\Theta = 100$ К) отримаємо: $\delta T_2 \cong 10^{-5}$.

Отримана цього разу величина часової нестабільності є значно суттєвішою, загрожуючи, на перший погляд, перекреслити всі отримані раніше розрахункові оцінки [7]. Однак, як зазначалося в [11], гнучкість опрацювання

результатів вимірювань методами і засобами комп'ютерної техніки дозволяє ввести в алгоритм опрацювання підпрограму відповідної температурної корекції, яка згідно зі змінами температури навколишнього середовища автоматично буде коригувати результати вимірювань. З цією метою вимірювача, результати вимірювань якого необхідно коригувати, слід додатково оснастити високоточним вимірювачем температури, наприклад, резистивним, а при необхідності забезпечення ще меншої похибки вимірювань

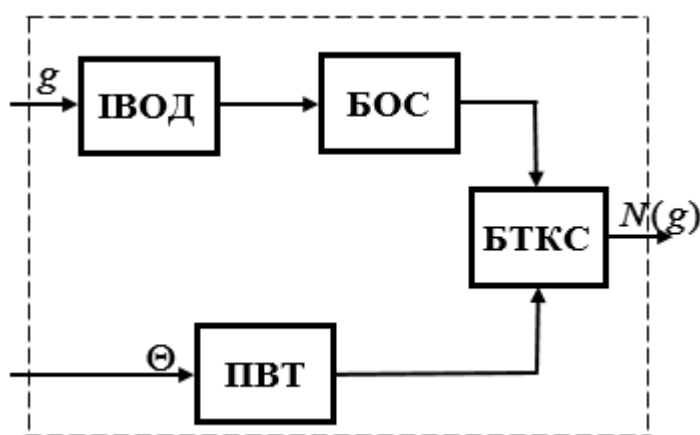


Рис.2. Фрагмент схеми температурної корекції сигналу

температури, то і вимірювачем на основі ІВОД температури такого ж класу, як і ІВОД прискорення. Можливий варіант схеми температурної корекції сигналу, вбудованої як фрагмент в загальну схему опрацювання сигналу ІВОД, наведено на рис. 2, на якому: g – вимірювана величина; Θ – температура навколишнього середовища; $N(g)$ – відкоригований

цифровий вихідний сигнал ІВОД. На схемі показано: БОС – блок опрацювання сигналу ІВОД; ПВТ – прецизійний вимірювач температури; БТКС – блок температурної корекції сигналу.

Вплив нестабільності періоду обертання.

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

Для характеристики селективних властивостей коливальної системи використовують такий вираз для добротності: $Q = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega_{0,7}}$, де $\omega_{0,7}$ – частота

власних коливань системи, а $\Delta\omega_{0,7}$ – відхилення частоти зовнішніх збуджуючих коливань від частоти власних коливань системи, за якого енергія коливань системи зменшується вдвічі.

Очевидно, таке визначення добротності не узгоджується з маятниковою системою ІВОД, оскільки в цій автоколивальній системі частота її збудження (підживлення системи енергією ззовні) визначається частотою власних коливань системи. Величина флуктуації частоти системи в цьому випадку буде визначатися зменшенням енергії коливальної системи не вдвічі,

а лише в $\frac{\Delta W}{W}$ разів (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, який нас цікавить, залежність $\Delta\omega = f(\Delta W)$ є лінійною (коефіцієнт пропорційності прийmemo рівним одиниці), а також враховуючи, що підживлення системи енергією в нашому випадку відбувається чотири рази за період, можна записати:

$$\delta T_3 = \frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\pi}{2Q^2} \quad (6)$$

Відомо, що для побудови високодобротних коливальних систем використовують скрізь, де це є можливим, кварц. Так, за даними [12] добротність коливальної системи на основі кварцової пластини, яка використовувалася в якості випромінювача ультразвукових хвиль в повітрі, дорівнювала 10^5 . Добротність коливальних систем на основі кристалів кварцу може сягати величин $\sim 10^7$ [13]. А використання досконалого бездислокаційного кварцу дозволило створити гіпердобротну коливальну систему з добротністю, що перевищувала 10^{10} [14].

Беручи до уваги те, що в нашому випадку підвіс ЧЕМ виконано на основі відрізка ВС, який є аморфним кварцом (кварцовим склом), покритим зовні полімерною плівкою, а також беручи до уваги специфіку механізмів втрат енергії конічного маятника (внутрішнє тертя в ВС в окресі його підвісу, тертя самого конічного маятника об повітря), добротність такої коливальної системи буде, звичайно, меншою від наведених цифр.

Для досягнення максимально можливої величини добротності маятника ЧЕМ слід вжити превентивних заходів. Втрати відповідно з першим із вищезгаданих механізмів можна суттєво зменшити шляхом зменшення кута відхилення маятника, що практично і реалізується в нашому випадку: при $R = 2$ мм і $L = 100$ мм [7], кут відхилення маятника становить $\sim 1^\circ$. Другий механізм втрат можна усунути практично повністю, розмістивши ЧЕМ (або і весь ІВОД) у вакуумованому об'ємі; ця умова виконується автоматично при експлуатації ІВОД в космосі.

Враховуючи сказане, величину добротності маятника ЧЕМ, як механічної коливальної системи, прийmemo, з певною долею обережності, такою, що дорівнює $\sim 10^4$. Підстановка такого значення величини Q в (6) дає: $\delta T_3 \cong 10^{-8}$.

Отримана величина є співвимірною з величиною відношення періоду підрахункових імпульсів до періоду обертання маятника ($\frac{\tau}{T} \approx 10^{-9}$) [11] і, в принципі, може спотворювати результати вимірювань прискорення, особливо, поблизу порогу чутливості акселерометра.

Однак і в цьому випадку ситуацію можна виправити. Враховуючи статистичний характер розкиду значень періоду обертання маятника навколо його центрального значення, похибка вимірювання величини прискорення може бути зменшеною в процесі опрацювання сигналу ІВОД. Досягається це шляхом усереднення результатів вимірювань за кілька періодів обертання маятника: *середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного n однаково розподілених взаємно незалежних випадкових величин в \sqrt{n} разів менше від середнього квадратичного відхилення кожної із величин* [15]. Таким чином, усереднення результатів вимірювань, наприклад, за 100 періодів обігу маятника ІВОД, дозволяє на порядок зменшити величину δT_3 . Очевидною платою за підвищення якості вимірювання буде зменшення швидкодії вимірювача, однак, беручи до уваги повільність змін значень прискорень реальних рухомих об'єктів – носіїв акселерометрів, небезпека “провалів” в процесі вимірювань є несуттєвою.

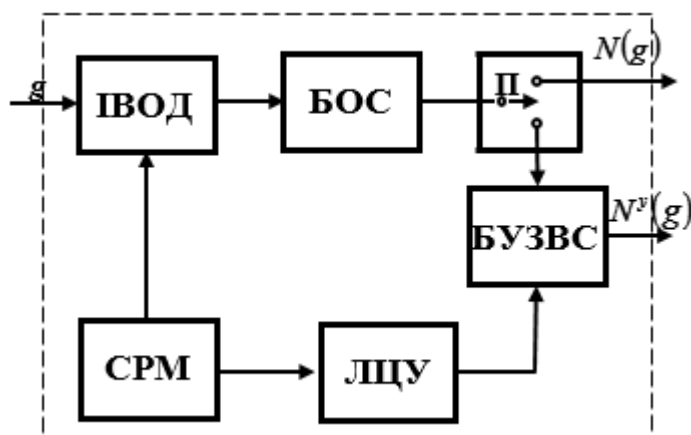


Рис.3. Фрагмент схеми усереднення сигналу

Можливий варіант побудови схеми реалізації процесу усереднення результатів кількох послідовних вимірювань, як можливий фрагмент загальної схеми опрацювання сигналу ІВОД, представлена на рис. 3. Тут: g – вимірювана величина; $N(g)$ – нормальний, «неопрацьований» вихідний сигнал; $N^y(g)$ – усереднене значення вихідного сигналу.

На схемі показано: БОС – блок опрацювання сигналу ІВОД; П – перемикач вибору режиму усереднення сигналу; СРМ – стимулятор руху маятника; ЛЦУ – лічильник циклів усереднення; БУЗВС – блок усереднення значень вихідного сигналу.

Зробимо зауваження до цього підрозділу. Як видно з виразу (6), для підвищення стабільності періоду обертання маятнікової ЧЕМ, бажано мати якомога більше значення його добротності, як коливальної системи. Однак, чим більша добротність коливальної системи, тим менший у неї коефіцієнт загасання, а отже, тим довше вона перебуватиме в русі після виведення її зі стану рівноваги. Це означає також, що і релаксація високодобротної маятнікової системи, після виведення її із усталеного режиму руху, буде також відбуватися протягом тривалого часу: $\tau \gg T$ (тут τ – час релаксації (зату-

ханья збурень) системи; T – період її циклічного руху). Вочевидь, така ситуація є небажаною, оскільки вона може спричинити спотворення результатів вимірювання впродовж всього часу релаксації коливальної системи.

Однаке, широкі можливості комп'ютерного опрацювання результатів вимірювання і керування роботою вимірювача, дозволяють відкоригувати і цю ситуацію.

Рух виведеного зі стану рівноваги кінцевого маятнікового ЧЕМ, як системи, що має лише один ступінь свободи (ним є радіус кола обігу r інерційної маси m (рис.1)), описується рівнянням:

$$m\ddot{r} + \mu\dot{r} + Ar = 0 \quad (7)$$

до якого в нашому випадку зводиться повна система рівнянь Лагранжа [19]. Це рівняння є сумою всіх сил, що діють на інерційну масу виведеного зі стану рівноваги і полишеного самого на себе кінцевого маятника: $m\ddot{r}$ – радіальна сила інерції Д'Аламбера; $\mu\dot{r}$ – сила опору рухові маятника, що обумовлює дисипацію його енергії; Ar – сила пружності консолі ВС, з інерційною масою на її вільному кінці. Відповідно: r, \dot{r}, \ddot{r} – радіус-вектор, швидкість та доцентрове прискорення колового руху інерційної маси m кінцевого маятника.

Зазвичай рівнянню (7) надають такого вигляду:

$$\ddot{r} + 2\beta\dot{r} + \omega_0^2 r = 0 \quad (8)$$

де: $\beta = \frac{\mu}{2m} = \frac{1}{\tau}$ – коефіцієнт згасання модуля радіуса-вектора з плином часу;

μ – коефіцієнт опору рухові маятнікового ЧЕМ; τ – час релаксації (змен-

шення в e разів) радіуса кола обігу; $\omega_0 = \sqrt{\frac{A}{m}}$ – циклічна частота вільного незатухаючого руху кінцевого маятника (за відсутності втрат енергії, коли $\beta = 0$); A – жорсткість консолі ВС, яка слугує підвісом інерційної маси.

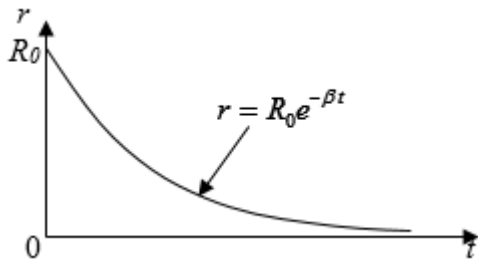


Рис.4. Зменшення радіуса кола обігу кінцевого маятника в часі

Розв'язок цього рівняння показує, що радіус кола обігу кінцевого маятника з плином часу буде зменшуватися (див. ілюстрацію рис.4, де R_0 – початкове, при $t = 0$, значення радіусу).

Дамо оцінку величини часу релаксації радіуса кола обігу ІВОД: $m = 10$ г, $L = 10$ см, $T_0 = 12,5$ с [7]. Виходячи із відомих співвідношень та

прийнятого вище значення добротності кінцевого маятника, отримаємо:

$$\tau = \frac{1}{\beta} = \frac{QT_0}{\pi} = \frac{10^4 \cdot 12,5}{3,14} \approx 4 \cdot 10^4 \text{ с} \approx 11 \text{ год.}$$

Вважаючи, що втрати енергії маятника обумовлюються лише внутрішнім тертям у його підвісі, обрахуємо (з урахуванням (4)) втрати енергії маятника на протязі одного періоду його обігу:

$$\Delta W = 2\pi \frac{W}{Q} = \frac{8\pi^3 m R^2}{QT^2} \approx 6,4 \cdot 10^{-12} \text{ Дж.}$$

Щоб рух маятника був незгасаючим, необхідно компенсувати втрати його енергії. Цього можна досягти дією на маятник зовнішньої періодичної сили, яку можна реалізувати, наприклад, за допомогою електромагнітів (на рис.1 вони не показані), розташованих в площині кола обігу маятника; інерційна маса, очевидно, має бути виконаною із магнітного матеріалу. В установленому режимі роботи ІВОД система керування рухом маятника так регулює струми в обмотках електромагнітів, що вони по чергово підштовхують інерційну масу, що пролітає мимо кожного з них, підтримуючи біг кінцевого маятника незатухаючим.

В разі ж небажаних збурень стаціонарного руху кінцевого маятника, наприклад, при дії на об'єкт, що несе ІВОД, зовнішніх механічних дій (удари, вібрації), система керування рухом маятника, відслідковуючи його рух, так перерозподілить струми в обмотках електромагнітів, що вони своєю дією на інерційну масу обумовлять швидку релаксацію збурення і, відповідно, швидко набуття кінцевим маятником усталеного режиму руху.

Підсумовуючи проведений аналіз, зауважимо, що результатом дії всіх розглянутих дестабілізуючих факторів, є спотворення параметрів ЧЕМ. Внаслідок цього, спотворюється передавальна характеристика ІВОД, що обумовлює спотворення результатів вимірювання. Обумовлена таким чином похибка вимірювання визначає собою мінімально можливе значення вимірюваної величини, обмежуючи тим самим діапазон значень вимірюваної величини «знизу». Цю ситуацію можна тлумачити і як формування певного рівня мінімально досяжної чутливості або «порогу чутливості» для даного вимірювача в конкретних умовах його використання.

Гравітаційний шум

Поряд з розглянутими дестабілізуючими факторами не можна обійти увагою природний гравітаційний фон Землі. Оскільки практично всі вимірювачі на основі ІВОД працюють в земних умовах, то цей фактор є присутнім завжди і *a priori* впливає на результати вимірювань. На відміну від попередньо розглянутих факторів, вплив яких на ІВОД спотворює результати вимірювань, гравітаційний фон Землі не впливає на параметри вимірювача. Він є, власне, природним шумом, на тлі якого вимірювач просто не в змозі сприймати сигнали з рівнями, нижчими від рівня цього шуму. Можна і цю

ситуацію інтерпретувати таким чином, що в даних умовах експлуатації гравітаційний фон Землі також визначає «поріг чутливості» для вимірювача.

Гравітаційний шум, або сейсмічна активність Землі, виявляє себе не лише у вигляді землетрусів та пов'язаних з ними тектонічними процесами в земних надрах. Тріски та мікротріски, що відбуваються постійно і всюди, складають єдиний природний шумовий процес, так звану *сейсмічну емісію*. На інтенсивності сейсмічної емісії відбиваються також місячно-сонячі припливи, власні коливання Землі після землетрусів, штормові мікросейсми, тощо. Так, шторми в Балтійському морі обумовлюють в м.Обнінську, що за 100 км на захід від Москви, чотирьох-шестисекундні коливання ґрунту з амплітудою 1 – 5 мкм. Відповідно цьому гравітаційний фон складає $\sim 10^{-6} g$ [16]. Зрозуміло, що для промислово активних центрів, де є наземний і підземний залізничний транспорт, гідро- і теплостанції, виробничі підприємства і т.п., гравітаційний фон буде суттєво більшим.

За даними [17] рівень мікросейсмічних шумів в бухті Витязь Японського моря (Російська Федерація), був в межах від 100 до 200 мкГал ($(1 - 2) 10^{-7} g$), а приблизно за 40 годин до землетрусу зріс до 400-500 мкГал.

Рекордну чутливість $\sim 10^{-9} g$ вдалося реалізувати авторам [18] для свого атомного гравіметра, опустивши його для цього в шахту з низьким рівнем шумів на глибину 500 м та усереднивши результати вимірювань в інтервалі часу 100 с. Додамо, що пробною (чутливою) масою гравіметра була хмарка охолоджених до температури $2 \cdot 10^{-6} K$ атомів ^{87}Rb , які під дією сили тяжіння падали у вакуумі в тривимірну магнітно-оптичну яму, що створювалася після адіабатичного вимикання лазерних променів.

Наведені дані говорять про те, що наявність природного гравітаційного шуму Землі унеможливорює перевірку в земних умовах граничних розрахункових даних для акселерометрів-гравіметрів на основі ІВОД. Виходом із цієї ситуації може бути лише провівши випробування таких вимірювачів на борту космічних апаратів в умовах їх вільного польоту.

Висновки

Проведені оцінкові розрахунки рівнів впливу різного роду дестабілізуючих факторів на похибки вимірювачів на основі ІВОД показали, що вжиття належних заходів при облаштуванні умов роботи ЧЕМ ІВОД, а також відповідне опрацювання отриманих за його допомогою результатів вимірювань, дозволяє сподіватися, що високі розрахункові значення параметрів вимірювачів на основі ІВОД можуть бути значною мірою реалізованими і в реальних умовах його експлуатації. Однак, остаточну відповідь на питання про можливість досягнення максимально можливих розрахункових параметрів вимірювачів на основі ІВОД можна отримати лише після тестування таких вимірювачів на борту космічних апаратів в умовах їх вільного польоту, а ще краще, взагалі за межами їх борту – у відкритому космосі.

Перелік посилань

1. Демьяненко П. А. Предельные возможности аналоговых оптических датчиков в составе ВОС // Радиотехника. – 1988. – №2. – с. 88-90.
2. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ ; под ред. Т. Окоси. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 256 с.
3. Гуляев Ю. В. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы / Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов, В. Т. Потапов, Ю. К. Чаморовский // Фотон-Экспресс. – 2005. – Т. 46, № 6. – с. 114-127. – Режим доступа : <http://fotonexpress.ru/pdf/st/114-127.pdf>
4. Гармаш В. Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении / В. Б. Гармаш, Ф. А. Егоров, Л. Н. Коломиец, А. П. Неугодников, В. И. Поспелов // Фотон-Экспресс. – 2005. – Т. 46, № 6. – с. 128-140. – Режим доступа : <http://fotonexpress.ru/pdf/st/128-140.pdf>
5. Жижин В. Волоконно-оптические датчики: перспективы промышленного применения // Электронные компоненты. – 2010. – №12. – с. 17-23. – Режим доступа : <http://www.russianelectronics.ru/skachivanie/54040/0/>
6. Демьяненко П. А. Точность измерений посредством волоконно-оптических датчиков (проблема и пути их решения) / П. А. Демьяненко // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. – 1995. – вып. 29. – с.88-93.
7. Демьяненко П. А. Прецизионный цифровой акселерометр с волоконно-оптическим датчиком / П. А. Демьяненко, Ю.Ф. Зиньковский, М. И. Прокофьев // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1997. – Т.40, №1. – с.39-47.
8. Дем'яненко П. О. Цифровий прецизійний волоконно-оптичний гравіметр / П. О. Дем'яненко, Ю. Ф. Зіньковський, М. І. Прокоф'єв // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 1997. – №. 58. – с. 239-241.
9. Пат. 2146373 РФ, МПК7 G 01 P 15/08. Волоконно-оптический датчик ускорения / Демьяненко П. А., Прокофьев М. И. – № 2000131736/09; заявл. 02.08.1995; опубл. 10.03.2000.
10. Сивухин Д. В. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1990. – 592 с.
11. Демьяненко П. А. Обработка сигналов в измерителях с импульсными волоконно-оптическими датчиками / П. А. Демьяненко, Ю. Ф. Зиньковский, М. И. Прокофьев // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1998. – Т.41, №1. – С.54-60.
12. Лепендин Л. Ф. Акустика / Л. Ф. Лепендин. – М. : Высш. школа, 1978. – С.488.
13. Поляков А. Прецизионные кварцевые датчики производства российской компании «СКТБ ЭлПА» / А. Поляков, И. Заднепрянный, В. Поляков, В. Симонов // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6. – Режим доступа : http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2005_06_54.pdf
14. Зеленка И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: материалы, технология, конструкция, применение : пер. с чешск. / И. Зеленка. – М. : Мир, 1990. – 584 с.
15. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 1972. – С. 368.
16. Николаев А. В. Развитие физических основ новых методов сейсмической разведки. Научное сообщение // В Президиуме Академии наук СССР. – 1985. – № 3. – С.18-27. – Режим доступа : http://www.ras.ru/publishing/raserald/raserald_articleinfo.aspx?articleid=4597a274-22a8-44f7-8ce8-a4807781b1d4

17. Лисунов Е. В. Регистрация микросейсмических шумов перед сильными землетрясениями с использованием гравиметра GPHONE [Электронный ресурс] / Е. В. Лисунов, А. С. Бебнев. – Режим доступа : http://www.emsd.ru/conf2015lib/pdf/tsunami/Lisunov_Bebnev.pdf

18. Фара Т. Транспортируемый гравиметр на холодных атомах разработки LNE-SYRTE: работа в подземных условиях в режиме наилучшей чувствительности / Т. Фара, К. Герлен, А. Ландражен, Ф. Буйе, С. Гаффе, Ф. Перейра Дос Сантос, С. Мерле // Гироскопия и навигация. – 2014. – Т. 86, №3. – С. 3-14. – Режим доступа : <http://gyroscopy.elpub.ru/jour/article/view/123>

19. Демьяненко П. А. Волоконно-оптические датчики с импульсной модуляцией оптического потока / П. А. Демьяненко, Ю. Ф. Зиньковский // Космічна наука і технологія. – 2015. Т.21, №4. – с.3-18.

References

1. Dem'yanenko P.A. (1988) Predel'nye vozmozhnosti analogovykh opticheskikh datchikov v sostave VOS [Extreme performance of analog optical sensors as a part of a fiber optical system]. *Radiotekhnika*, No 2, pp. 88-90.

2. Okosi T. ed., Okamoto K., Otsu M., Nisikhara Kh., Kyuma K. and Khatate K. (1990) *Volokonno-opticheskie datchiki* [Fiber Optic Sensors]. Leningrad, Energoatomizdat, 256 p.

3. Gulyaev Yu. V., Nikitov S. A., Potapov V. T. and Chamorovskii Yu. K. (2005) *Volokonno-opticheskie tekhnologii, ustroistva, datchiki i sistemy* [Fiber optic technology, devices, sensors and systems]. *Foton-Ekspres*, Vol. 46, No 6, pp. 114-127.

4. Garmash V. B., Egorov F. A., Kolomiets L. N., Neugodnikov A. P. and Pospelov V. I. (2005) *Vozmozhnosti, zadachi i perspektivy volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh sistem v sovremennom priborostroenii* [Opportunities, Challenges and Prospects of fiber optic measurement systems in modern instrument]. *Foton-Ekspres*, Vol. 46, No 6, pp. 128-140.

5. Zhizhin V. (2010) *Volokonno-opticheskie datchiki: perspektivy promyshlennogo primeneniya* [Fiber Optic Sensors: prospects for industrial applications]. *Elektronnye komponenty*, No 12, pp. 17-23.

6. Dem'yanenko P. A. (1995) *Tochnost' izmerenii posredstvom volokonno-opticheskikh datchikov (problemi i puti ikh resheniya)* [Measurement precision of fiber-optic sensors (Problems and Solutions)]. *Optoelektronika i poluprovodnikovaya tekhnika*, Iss. 29, pp.88-93.

7. Dem'yanenko P. A., Zin'kovskii Yu.F. and Prokof'ev M. I. (1997) *Pretsizionnyi tsifrovoy akselerometr s volokonno-opticheskim datchikom* [Precision digital accelerometer with a fiber-optic sensor]. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*, Vol. 40, No 1, pp. 39-47.

8. Dem'yanenko P. O., Zinkovskiy Yu. F. and Prokofiev M. I. (1997) *Tsyfrovyyi pretsyziynyi volokonno-optychnyi hravimetr* [Digital precision fiber optic gravimeter]. *Heodeziia, kartografiia i aerofotozнимання*, No. 58, pp. 239-241.

9. Dem'yanenko P. A. and Prokof'ev M. I. (2000) *Volokonno-opticheskii datchik uskoreniya* [A fiber optic accelerometer] / Pat. RU2146373.

10. Sivukhin D. V. (1990) *Termodinamika i molekulyarnaya fizika* [Thermodynamics and Molecular Physics]. – Moscow, Nauka Publ. 592 p.

11. Dem'yanenko P. A., Zin'kovskii Yu. F. and Prokof'ev M. I. (1998) *Obrabotka signalov v izmeritelyakh s impul'snymi volokonno-opticheskimi datchikami* [Signal processing in the meters with pulsed fiber optic sensors]. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*, Vol. 41, No 1, pp. 54-60.

12. Lependin L. F. (1978) *Akustika* [Acoustics]. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 488 p.

13. Polyakov A., Zadnepryanni I., Polyakov V. and Simonov V. (2005) *Pretsizionnye kvartsevye datchiki proizvodstva rossiiskoi kompanii «SKTB EIPA»* [Precision Quartz sensors

produced by Russian company "SKTB ELPA"]. *Components & Technologies*, No 6, 3 p.

14. Zelenka I. (1990) *P'ezoelektricheskie rezonatory na ob'emnykh i poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh: materialy, tekhnologiya, konstruktsiya, primeneniye* [The piezoelectric resonators on bulk and surface acoustic waves: the materials, technology, design, application]. Moscow, Mir Publ, 584 p.

15. Gmurman V. E. (1972) *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moscow, Vysshaya shkola, 368 p.

16. Nikolaev A. V. (1985) Razvitie fizicheskikh osnov novykh metodov seismicheskoi razvedki. Nauchnoe soobshchenie [The development of physical foundations of new seismic methods. Scientific report]. *V Prezidiume Akademii nauk SSSR*, No 3. pp.18-27.

17. Lisunov E. V. and Bebnev A. S. *Registratsiya mikrozeimicheskikh shumov pered sil'nymi zemletryasenyami s ispol'zovaniem gravimetra GPHONE*. Available at : http://www.emsd.ru/conf2015lib/pdf/tsunami/Lisunov_Bebnev.pdf

18. Farah T., Guerlin C., Landragin A., Bouyer P., Gaffet S., Pereira Dos Santos F. and Merlet S. (2014) Underground operation at best sensitivity of the mobile Ine-syrte cold atom gravimeter. *Girokopiya i Navigatsiya*, No 3, pp. 3-14. (In Russian)

19. Demianenko P. O. and Zinkovski Yu. F. (2015) Fiber-optic sensors with a pulse-modulated optical flow. *Kosm. nauka tehnol.*, Vol. 21, No 4, pp. 3-18. DOI: 10.15407/knit2015.04.003

Дем'яненко П. О., Зіньковський Ю.Ф. Нейтралізація впливу дестабілізуючих факторів на похибки вимірювачів на основі волоконно-оптичних давачів з імпульсною модуляцією. Розглянуто можливі впливи дестабілізуючих факторів, зокрема, температури та дисипативних процесів, на параметри акселерометрів-гравіметрів на основі волоконно-оптичних давачів. Окрему увагу приділено впливу гравітаційного фону Землі. Показано, що за умови належного опрацювання результатів вимірювання розрахункові значення параметрів вимірювачів можуть бути значною мірою реалізованими і в реальних умовах його експлуатації.

Ключові слова: дестабілізуючі фактори, прецизійні волоконно-оптичні давачі, волоконно-оптичні акселерометри-гравіметри.

Демьяненко П. А., Зиньковский Ю .Ф. Нейтрализация влияния дестабилизирующих факторов на погрешности измерителей на основе волоконно-оптических датчиков с импульсной модуляцией. Рассмотрены возможные влияния дестабилизирующих факторов, в частности, температуры и диссипативных процессов, на параметры акселерометров-гравиметров на основе волоконно-оптических датчиков. Особое внимание уделено влиянию гравитационного фона Земли. Показано, что при условии надлежащей обработки результатов измерения расчетные значения параметров измерителей могут быть в значительной мере реализованы и в реальных условиях его эксплуатации.

Ключевые слова: дестабилизирующие факторы, прецизионные волоконно-оптические датчики, волоконно-оптические акселерометры-гравиметры.

Dem'yanenko P. O., Zinkovskiy Yu. F. Neutralizing the effect of destabilizing factors on the meter's accuracy on the basis of fiber-optic sensors with pulse modulation.

Introduction. Disclaimer analog and switch to the principles of pulse modulation can significantly increase accuracy by using fiber optic sensors. Were developed precision optical fiber sensors of new class width modulation intensity flux of optical radiation.

Main part. It consists of three sections.

The first section is estimated effect of temperature on the performance accuracy of meters based on fiber optic sensors with pulse modulation. It is shown that the use of preventive measures and proper processing of signals in the fiber-optic sensors, temperature influence on the metrological parameters meters largely be compensated.

The second section examines the impact of volatility period pendulum rotation sensor. It is shown that the introduction of special schemes correction element allows movement of the pendulum in this case ensures high metrological performance of meters based on fiber optic sensors with pulse modulation.

The final section shows that the presence of natural gravitational background does not allow to explore on Earth is extremely achievable design parameters measuring devices of this class. This can be done only on the spacecraft in conditions of free flight.

Conclusions. Taking precautions and proper processing of signals pulsed optical fiber sensors enables significantly to achieve the calculated values of metrological parameters measuring devices based on optical fiber sensors with pulse modulation and when used under normal terrestrial conditions. However, extensive research capabilities of metrological meters from these sensors may only be carried out on board the spacecraft, provided their free flight.

Keywords: destabilizing factors, precision fiber-optic sensors, fiber-optic accelerometers, gravimeters.