

УДК 681.586.5; 531.768.

## **ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ ІМПУЛЬСНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ДАВАЧА ПРИСКОРЕННЯ<sup>1</sup>**

*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*

### **SIGNAL PROCESSING OF THE OPTICAL FIBER IMPULSE SENSOR ACCELERATION**

*Dem'yanenko P. O., PhD, Associate Professor;  
Zinkovsky Yu. F., Doc.of Sci(Technics), Professor  
National Technical University of Ukraine «Kyiv polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

#### **Вступ**

Використання в сучасній техніці традиційних електричних давачів часто наштовхується на важкорозв'язувані проблеми захисту як їх самих, так і трактів каналювання їхніх сигналів від різних електромагнітних (ЕМ) завад. В цьому сенсі привабливими є волоконно-оптичні давачі (ВОД) з принциповою невразливістю їхніх сигналів збоку будь-яких ЕМ завад.

Нажаль, як показала практика, на основі звичайних аналогових ВОД неможливо побудувати прецизійних вимірювачів фізичних величин, зокрема, акселерометрів, які могли б скласти гідну конкуренцію електричним вимірювачам. Так, наприклад, описаний в [1] ВОД прискорення, який модулює інтенсивність оптичного потоку, має порогову чутливість  $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  g. Для ВОД прискорення, в основі роботи якого лежить ефект фотопружності [2], експериментально визначені мінімальні значення порогового прискорення склали  $\sim 8,5 \cdot 10^{-8}$  g.

Рекордну чутливість, що склала  $10^{-9}$  g, отримали автори [3] при вимірюванні прискорення сили тяжіння, опосередкувавши результати вимірювань в інтервалі часу 100 с. Ці дані були реалізовані завдяки використанню мобільного атомного гравіметра, який розміщувався в підземній дослідницькій лабораторії з низьким рівнем шумів на глибині 500 м. Пробною (чутливою) масою гравіметра була хмаринка охолоджених до температури  $2 \cdot 10^{-6}$  К атомів  $^{87}\text{Rb}$ , які під дією сили тяжіння падали в вакуумі в тривимірну магнітно-оптичну яму, що створювалася після адіабатичного відключення лазерних променів.

Зауважимо, що всі наведені приклади стосуються лабораторних макетів вимірювачів, яким до реальних вимірювальних інструментів необхідно по-

---

<sup>1</sup> <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1075>

долати ще не простий шлях.

Наведені вище цифри  $\epsilon$ , на перший погляд, вельми пристойними. Однак, для розв'язку низки нагальних задач геофізики та навігації порогову чутливість акселерометрів бажано мати від  $10^{-12}$  g і менше. Серед таких задач можна відзначити:

- експериментальна перевірка стабільності положення центра мас Землі;
- вимірювання параметрів траєкторії зміщення полюсів Землі;
- вимірювання гравітаційної сталої;
- вивчення неоднорідностей гравітаційного поля Землі та інших космічних об'єктів безпосередньо з орбіт їх штучних супутників за допомогою малорозмірних градієнтометрів;
- створення безплатформових інерціальних навігаційних систем для контролю і керування рухом автономних об'єктів (наприклад, підводних човнів, космічних апаратів) і т.п.

З доступних сьогодні на ринку промислових типів вимірювачів можна відзначити, наприклад, п'єзоелектричні акселерометри фірми ZETLAB. Серед них, наприклад, акселерометр типу AP 2050, порогова чутливість якого складає  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$  g [4].

Причиною незадовільних показників ВОД щодо точності є метрологічно низька якість потоку оптичного випромінювання у вимірювальному тракті ВОД, який одночасно є і носієм, і реципієнтом інформації [5]. Разом з тим, згадана вище перевага ВОД є настільки вагомою, що спонукає шукати шляхи виходу із ситуації, що склалася.

Її аналіз привів нас до усвідомлення необхідності відмови від аналогових і переходу до неаналогових (дискретних) принципів модуляції в ВОД. Реально це означає, що під час модуляції оптичного потоку в нього слід вводити нові, додаткові до оптичних але *неоптичні* параметри, які і будуть відтепер виконувати роль реципієнтів інформації. Такі ВОД зберігають всі переваги волоконної оптики, оскільки носієм інформації залишається оптичний потік. Разом з тим, проблема точності вимірювань переноситься із області принципово низькоточних вимірювань інтенсивності малопотужних оптичних потоків в інші, *неоптичні*, області, де цієї проблеми або просто немає, або вона там розв'язана на належному рівні.

Такий підхід дозволив розробити новий клас ВОД з імпульсною модуляцією інтенсивності оптичного потоку (ІВОД). Прикладом може бути давач лінійних прискорень, на основі якого можуть бути побудовані прецизійні акселерометри (гравіметри). Схематична будова трикоординатного ІВОД прискорення наведена на рис.1 [2]. Чутливим елементом (ЧЕ) тут є конічний маятник **1**, утворений консольно закріпленим відрізком кварцового волоконного світловода (ВС), на вільному кінці якого розміщена інерційна маса (ІМ) **2**. Незатухаючий рух ЧЕ підтримується почерговою сило-

вою дією електромагнітів 4. Розділення вхідного немодульованого і вихідного модульованого оптичних потоків відбувається у волоконно-оптичному розгалужувачі-суматорі 5. За відсутності прискорення, вісь обертання конічного маятника співпадає з його вертикальною віссю чутливості  $OZ$ , а його горизонтальні осі чутливості  $OX$  і  $OY$ , визначаються осями взаємноперпендикулярних циліндричних дзеркал 3, які за даної умови є і осями симетрії кола обігу маятника. Очевидно, за таких умов, інтервали часу перебування маятника обабіч кожної з горизонтальних осей будуть однаковими.

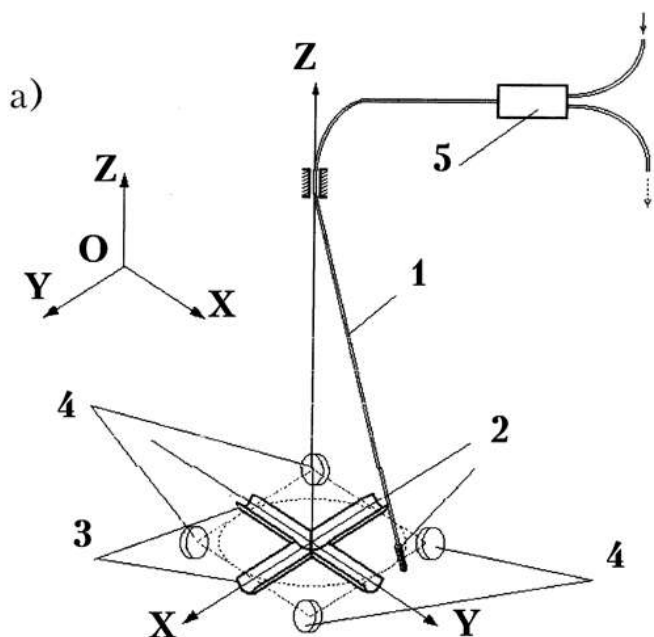


Рис.1. Схематична будова ІВОД прискорення.

Особливістю таких ІВОД є вплив вертикальної складової вектора прискорення на вихідний сигнал ІВОД для горизонтальних складових цього ж вектора. Для отримання неспотворених результатів вимірювання вихідні сигнали ІВОД мають бути відповідним чином відкориговані.

### Обробка інформації ІВОД при дії горизонтально орієнтованого вектора прискорення

Хай вектор прискорення  $a_y$ , що діє на ІВОД, співпадає з напрямком його горизонтальної осі чутливості  $OY$ , як це показано на рис. 2, де зображено лише коло обігу, яке описується кінцем конічного маятника. Дія прискорення зсуває це коло на величину  $y$  в напрямку, протилежному напрямку дії прискорення. На рис.2 ця ситуація відображена зсувом не самого кола обігу, а адекватним йому зсувом відповідної осі чутливості:  $OX \rightarrow O'X$ . Такий зсув, очевидно, порушує симетрію інтервалів часу перебування маятника обабіч осі  $O'X$ . Різницю цих інтервалів позначимо  $\Delta\tau_y$  і прийемо її в якості міри величини прискорення  $a_y$ . Щоб отримати аналітичний вираз  $a_y = f(\Delta\tau_y)$ , пов'яжемо величини  $a_y$  і  $y$  в рівняннях руху ІМ конічного маятника, скориставшись для цього законами Ньютона і Гука:

$$ma_y = -Ay, \quad (1)$$

або в канонічному вигляді:

$$\ddot{y} + \omega_0^2 y = 0.$$

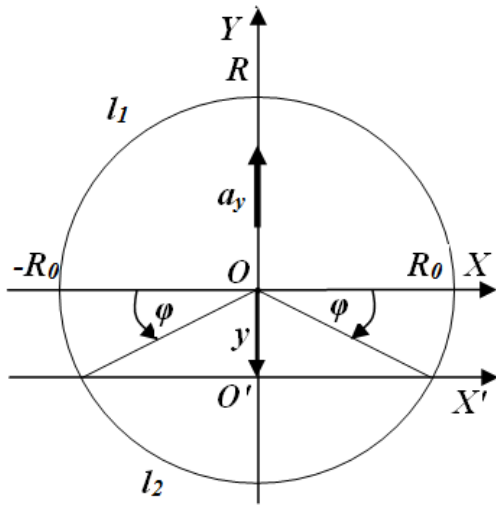


Рис. 2. Коло обігу маятника ІВОД.

В цих рівняннях:  $m$  – інерційна маса на кінці маятника;  $A = \frac{3EI}{L^3}$ ,  $E$ ,  $I = \frac{\pi d^4}{64}$ ,  $L$ ,  $d$  – відповідно: жорсткість, модуль Юнга, полярний момент інерції поперечного перерізу, довжина та діаметр консолі кварцового ВС;  $\omega_0 = \sqrt{\frac{A}{m}} = \sqrt{\frac{3EI}{mL^3}}$  – колова частота обертального руху кінцевого маятника.

Користуючись рис.2, пов'яжемо величину зсуву кола обігу кінцевого маятника  $y$  з різницею інтервалів часу  $\Delta\tau_y$  перебування ІМ обабіч осі  $O'X$ :

$$\begin{aligned} \Delta\tau_y &= \tau_1 - \tau_2 = \frac{l_1}{v} - \frac{l_2}{v} = \frac{R_0}{v} [(\pi + 2\varphi) - (\pi - 2\varphi)] = \\ &= 4 \frac{R_0}{\omega_0 R_0} \varphi = \frac{4}{\omega} \arcsin \frac{y}{R_0} = \frac{2T_0}{\pi} \arcsin \frac{y}{R_0} \end{aligned} \quad (2)$$

де  $l_1, \tau_1$  і  $l_2, \tau_2$  – частина довжини кола обігу та час перебування ІМ над віссю  $O'X$  і під нею, відповідно;  $v = \omega_0 R_0$ ,  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{mL^3}{3EI}}$  – лінійна швидкість та період колового руху ІМ;  $R_0$ ,  $\varphi = \arcsin \frac{y}{R_0}$  – радіус та кутова міра зсуву кола обігу ІМ.

Знак різниці  $\Delta\tau_y$  визначає напрямок складової вектора прискорення  $a_y$ : якщо  $\Delta\tau_y > 0$ , то напрямок  $a_y$  збігається з напрямком осі  $OY$ .

Із виразу (1):

$$y = -\frac{m}{A} a_y = -\frac{mL^3}{3EI} a_y = -\frac{T_0^2}{4\pi^2} a_y$$

Нехтуючи знаком «-» та підставивши цей вираз у (2), отримаємо:

$$\Delta\tau_y = \frac{2T_0}{\pi} \cdot \arcsin \left( \frac{T_0^2}{4\pi^2} \cdot \frac{a_y}{R_0} \right), \quad (3)$$

а розв'язавши (3) відносно  $a_y$ , маємо:

$$a_y = \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 R_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \Delta\tau_y}{2T_0}\right). \quad (4)$$

Очевидно,

$$a_y = 0 \text{ при } \Delta\tau_y = 0;$$

$$a_y = (a_y)_{\max} \text{ при } (\Delta\tau_y)_{\max} = T_0$$

(для забезпечення виконання умови таутохронності руху маятника приймаємо  $R_0 = 2$  мм).

З урахуванням цього із (4) отримаємо:

$$(a_y)_{\max} = \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 R_0 = \frac{3EI}{mL^3} R_0, \quad (4a)$$

При визначенні порогової чутливості акселерометра на основі такого ІВОД. будемо виходити з того, що вимірювання часових інтервалів  $\tau_1$  і  $\tau_2$  здійснюється шляхом підрахунку чисел імпульсів високочастотного ( $f_{ГВЧ} = 100$  МГц) генератора  $n_1$  і  $n_2$ , якими, відповідно, заповнюються ці інтервали, тобто:  $\tau_1 = n_1 T_{ГВЧ}$ , а  $\tau_2 = n_2 T_{ГВЧ}$ . Таким чином, різниця тривалостей вимірюваних інтервалів визначиться як

$$\Delta\tau_y = \Delta n T_{ГВЧ} = \frac{\Delta n}{f_{ГВЧ}},$$

де  $\Delta n = n_1 - n_2$ . Очевидно, умовою вимірювання порогової величини прискорення буде:  $\Delta n = 1$ .

Як і раніше, будемо вважати, що вимірювання періодів  $T_0$  і  $T_z$  здійснюється шляхом підрахунку числа імпульсів високочастотного генератора  $m_0$  і  $m_z$ , якими, відповідно, заповнюються ці часові інтервали, тобто:  $T_0 = m_0 T_{ГВЧ}$ , а  $T_z = m_z T_{ГВЧ}$ .

Тоді величина різниці тривалостей вимірюваних інтервалів буде:

$$\Delta\tau_z = \Delta m T_{ГВЧ} = \frac{\Delta m}{f_{ГВЧ}},$$

де  $\Delta m = m_0 - m_z$ .

Враховуючи, що  $(\Delta\tau_y)_{\text{пор}} = T_{ГВЧ} \ll T_0$ , а отже,  $\sin\left[\frac{\pi(\Delta\tau_y)_{\text{пор}}}{2T_0}\right] \cong \frac{\pi(\Delta\tau_y)_{\text{пор}}}{2T_0}$ ,

із виразу (4) отримаємо:

$$(a_y)_{\text{пор}} \cong \frac{2\pi^3 R_0}{T_0^3 f_{ГВЧ}} \quad (4б)$$

Динамічний діапазон прискорень, які можуть бути вимірними вздовж

осі  $OY$  за допомогою ІВОД, визначиться як:

$$N_y = \frac{(a_y)_{max}}{(a_y)_{пор}} = \frac{2}{\pi} T_0 f_{ГВЧ} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{T_0}{T_{ГВЧ}}.$$

Таким чином, при дії на ІВОД прискорення, вектор якого співпадає з напрямком горизонтальної осі  $OY$ , розрахунок значення прискорення  $a_y$  потребує: вимірювання тривалостей інтервалів часу перебування маятника обабіч осі  $OX$ , відповідно,  $\tau_1$  і  $\tau_2$ ; обрахування різниці часових інтервалів  $\Delta\tau_y = \tau_1 - \tau_2$ ; обрахування періоду обертання маятника  $T_0$ , як суми цих інтервалів:  $T_0 = \tau_1 + \tau_2$ ; та згідно з (4) – знаходження значення  $a_y$ .

Все мовлене стосовно складової прискорення  $a_y$  повною мірою стосується і складової прискорення  $a_x$ ;

У випадку довільної орієнтації вектора прискорення в горизонтальній площині його модуль визначиться як геометрична сума складових  $a_y$  і  $a_x$ :

$$a_{гор} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}.$$

### **Обробка інформації ІВОД при дії вертикально орієнтованого вектора прискорення**

У випадку дії на ІВОД прискорення вздовж осі  $OZ$ , бічних зсувів кола обігу маятника не відбувається і симетрія інтервалів часу перебування маятника обабіч горизонтальних осей не порушується. Однак, при цьому буде змінюватися сама тривалість періоду обертання конічного маятника.

Тривалість періоду, за умови коли на ІВОД діє прискорення  $a_z$ , позначимо як  $T_z$  (на відміну від  $T_0$ , коли  $a_z = 0$ ). Тоді в якості інформаційного параметра для визначення прискорення  $a_z$ , можна використовувати різницю тривалостей згаданих періодів  $\Delta\tau_z = T_0 - T_z$ .

Період обертання маятника при дії прискорення  $a_z$  визначає вираз [6]:

$$T_z = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{3EI}{mL^3} \pm \frac{a_z}{L}}} = \frac{T_0}{\sqrt{1 \pm \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{L} a_z}}; \quad (5)$$

тут знак «+» відповідає випадкові, коли напрямком складової вектора  $a_z$  збігається з напрямком осі  $OZ$ .

Використовуючи (5), запишемо вираз для  $\Delta\tau_z$ , а розв'язавши його відносно складової  $a_z$  отримаємо:

$$a_z = L \left( \frac{2\pi}{T_0} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{T_0}{T_z} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Як і раніше, будемо вважати, що вимірювання періодів  $T_0$  і  $T_z$  здійснюється шляхом підрахунку числа імпульсів високочастотного генератора  $n_0$  і  $n_z$ , якими заповнюються ці часові інтервали:  $T_0 = n_0 T_{\text{ГВЧ}}$ , а  $T_z = n_z T_{\text{ГВЧ}}$ .

Різниця тривалостей вимірюваних періодів визначиться як:

$$\Delta\tau_z = \Delta n T_{\text{ГВЧ}} = \frac{\Delta n}{f_{\text{ГВЧ}}},$$

де  $\Delta n = n_0 - n_z$ .

Порогова величина прискорення буде виміряна за умови:  $\Delta n = 1$ .

Враховуючи, що  $(\Delta\tau_z)_{\text{пор}} = T_{\text{ГВЧ}} \ll T_0$ , із виразу (6) отримаємо:

$$(a_z)_{\text{пор}} \cong L \left( \frac{2\pi}{T_0} \right)^2 \left( 2 \frac{\Delta\tau_z}{T_0} \right) = \frac{8\pi^2 L}{T_0^3} T_{\text{ГВЧ}} \quad (6a)$$

При визначенні максимального значення прискорення, яке може бути виміряним вздовж осі  $OZ$ , маємо певну невизначеність, оскільки немає чітких фізичних обмежень ні на саму величину прискорення, ні на можливість її визначення. Прийmemo величину  $(a_{\text{max}})_z$  такою, за якої період обертання маятника зменшиться, наприклад, вдвічі, тобто:

$$(\Delta\tau_z)_{\text{max}} = T_0 - (T_z)_{\text{max}} = T_0 - 0,5T_0 = 0,5T_0.$$

Враховуючи сказане, із виразу (6) отримаємо:

$$(a_z)_{\text{max}} = 12\pi^2 \frac{L}{T_0^2} \quad (6б)$$

Динамічний діапазон прискорень, які можуть бути виміряними вздовж осі  $OZ$  за допомогою ІВОД:

$$N_z = \frac{(a_z)_{\text{max}}}{(a_z)_{\text{пор}}} = \frac{3}{2} T_0 f_{\text{ГВЧ}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{T_0}{T_{\text{ГВЧ}}}.$$

Як бачимо, динамічні діапазони вимірюваних прискорень для горизонтальних та вертикальної осей ІВОД виявилися вельми близькими.

При дії на ІВОД прискорення, напрямок вектора якого співпадає з напрямком вертикальної осі  $OZ$ , визначення значення складової прискорення  $a_z$ , потребує: вимірювання тривалості періоду обертання маятника  $T_z$ ; обрахування різниці періодів обертання:  $\Delta\tau_z = T_0 - T_z$ ; обрахування за виразом (6) значення  $a_z$ .

### **Обробка інформації ІВОД при дії довільно орієнтованого вектора прискорення**

Ситуація, коли вектор прискорення має довільну орієнтацію означає, що в загальному випадку ненульовими є всі три проекції цього вектора на

осі координат. За таких умов при вимірюванні горизонтальних складових прискорення отримувані значення  $a_x$  та  $a_y$  будуть залежати від того, яке значення має складова прискорення  $a_z$ . Дійсно, поява вертикальної складової вектора прискорення  $a_z$  обумовлює згідно з (5), зміну періоду обертання маятника:  $T_0 \rightarrow T_z$ . І якщо тепер при вимірюваннях горизонтальної складової вектора прискорення, наприклад,  $a_y$  користуватися алгоритмом дій, згідно з п.1, то при цьому отримаємо вже не те значення  $\Delta\tau_y$ , яке відповідало умові  $a_z = 0$ , а деяке інше його значення  $(\Delta\tau_y)_z$ , підстановка якого у вираз (4) обумовить спотворення значення  $a_y$ .

Таким чином, в процесі вимірювання горизонтальних складових вектора прискорення необхідно коригувати їх значення відповідно зі значеннями вертикальної складової вектора прискорення

Використовуючи вирази (3) і (5), запишемо вираз для різниці інтервалів часу  $\Delta\tau_y$  за умови дії на ІВОД вертикальної складової прискорення  $a_z$ :

$$(\Delta\tau_y)_z = \frac{2T_0}{\pi\sqrt{1 \pm \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{L} a_z}} \arcsin \left\{ \frac{T_0^2}{4\pi^2 \left[ 1 \pm \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{L} a_z \right]} \cdot \frac{a_y}{R_0} \right\}. \quad (7)$$

Аналіз рівняння (7) показує, що при дії на ІВОД складової прискорення  $a_z$ , неспотворене значення складової прискорення  $a_y$  може бути знайденим, як розв'язок цього рівняння:

$$a_y = 4\pi^2 R_0 \cdot \frac{1 \pm \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{L} a_z}{T_0^2} \cdot \sin \left[ \frac{\pi\sqrt{1 \pm \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{L} a_z}}{2T_0} \cdot (\Delta\tau_y)_z \right] \quad (8)$$

Як і раніше, все мовлене стосовно складової прискорення  $a_y$  повною мірою стосується і складової прискорення  $a_x$ .

Сформулюємо загальний алгоритм проведення вимірювань всіх складових довільно орієнтованого вектора прискорення, що діє на ІВОД. Для цього необхідно виконати такі операції:

- вимірювання тривалості періоду обертання маятника  $T_z$ ;
- обрахування різниці періодів обертання:  $\Delta\tau_z = T_0 - T_z$ ;
- обрахування значення  $a_z$  через значення  $T_z$ , і  $\Delta\tau_z$ ;



- вимірювання тривалості інтервалів часу  $(\tau_1)_z$  і  $(\tau_2)_z$  перебування маятника окремо з кожного боку осі  $OX$ ;
- обрахування різниці часових інтервалів  $(\Delta\tau_y)_z = (\tau_1)_z - (\tau_2)_z$ ;
- через  $a_z$ ,  $(\Delta\tau_y)_z$ ,  $T_0$  і вираз (8), обрахування значення  $a_y$ .
- аналогічним чином обрахувати значення  $a_x$ .

### Оцінка ефективності обробки інформації ІВОД

Дамо оцінку ефективності запропонованої корекції сигналів ІВОД. Для цього порівняємо значення горизонтальних складових вектора прискорення, отриманих без обробки інформації та за умови наявності такої обробки.

Для цього досить скласти відношення значень  $a_y$ , обрахованих за виразами (4) і (8), і дослідити поведінку цього відношення при зміні величини  $a_z$ . Запишемо це відношення і після елементарних перетворень отримаємо:

$$K_{yz} = \frac{a_y^{(4)}}{a_y^{(8)}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot \Delta\tau_y}{2T_0}\right)}{\left[1 \pm \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{L} a_z\right] \cdot \sin\left[\frac{\pi \sqrt{1 \pm \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{L} a_z}}{2T_0} \cdot (\Delta\tau_y)_z\right]}, \quad (9)$$

де  $a_y^{(4)}$  та  $a_y^{(8)}$  – горизонтальні складові прискорення, обраховані, відповідно, за виразами (4) і (8).

Отриманий результат розглядаємо як проміжний, тому, що він не придатний для аналізу, оскільки в ньому не відображено в явному вигляді зв'язок між величинами  $\Delta\tau_y$  і  $(\Delta\tau_y)_z$ . Пов'яжемо їх між собою.

Як було показано (див. вирази (5) і (7)), поява вертикальної складової прискорення  $a_z$ , обумовлює зміну періоду обертання маятника ( $T_0 \rightarrow T_z$ ), внаслідок чого  $\Delta\tau_y$  трансформується в  $(\Delta\tau_y)_z$ . Очевидно, різниця інтервалів часу перебування маятника обабіч осі  $OX$  є пропорційною періоду його обертання за будь-якої величини цього періоду. Виходячи з цього, можна записати:

$$\frac{\Delta\tau_y}{(\Delta\tau_y)_z} = \frac{T_0}{T_z} = \sqrt{1 \pm \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{L} a_z}$$

Користуючись цим виразом, можна суттєво спростити вираз (9):

$$K_{yz} = \frac{a_y^{(4)}}{a_y^{(8)}} = \frac{1}{1 \pm \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{L} a_z} \quad (9a)$$

Однак, для випадку вимірювача надмалих прискорень цей вираз буде малоінформативним, адже абсолютна величина коефіцієнта  $K_{yz}$  буде завжди дуже близькою до одиниці. З огляду на це, доцільно ввести новий коефіцієнт  $k_{yz}$ , який буде відображати тільки ту частину коефіцієнта  $K_{yz}$ , на яку він, власне, і буде відрізнятись від одиниці:

$$k_{yz} = 1 - K_{yz} = \frac{1}{1 \pm \frac{3EI}{mL^2} \cdot \frac{1}{a_z}} \quad (10)$$

Оцінка числового значення коефіцієнта  $\frac{3EI}{mL^2}$  у виразі (10) для акселерометра надмалих прискорень дає:  $2,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}^2 \cdot \text{м}^{-1}$ . Підрахунки проводилися для таких даних:  $E = 7,3 \cdot 10^{10} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ ;  $I = 1,2 \cdot 10^{-17} \text{ м}^4$ ;  $m = 0,01 \text{ кг}$ ;  $L = 0,1 \text{ м}$ , що є параметрами маятника на основі стандартного кварцового ВС [2]. За цих параметрів період вільного обертання маятника  $T_0 = 12,2 \text{ с}$ .

Практично у всьому діапазоні змін вертикальної складової вектора прискорення (від  $(a_z)_{\text{пор}} \cong \frac{8\pi^2 L}{T_0^3} \cdot \frac{1}{f_{\text{ГВЧ}}} \cong 4 \cdot 10^{-11} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  до  $a_z \cong 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ )

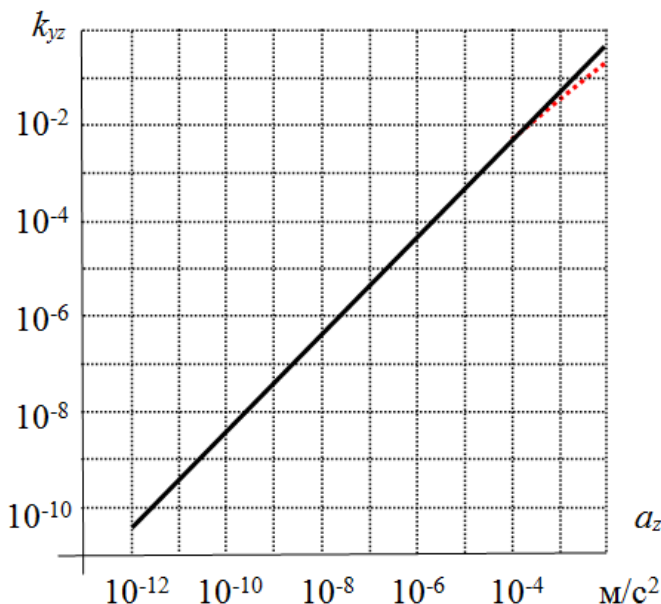


Рис. 3. Залежність коригуючого доданку  $k_{yz}$  від вертикальної складової  $a_z$ .

другий доданок, що стоїть в знаменнику виразу (10), значно перевищує одиницю. З огляду на це, у вказаному діапазоні змін  $a_z$  можна користуватися спрощеним виразом для обрахунку  $k_{yz}$ :

$$k_{yz} \cong \frac{mL^2}{3EI} a_z, \quad (10a)$$

який, власне, відображає пряму пропорційну залежність  $k_{yz}(a_z)$ , що добре видно на рис. 3.

З першого погляду на рис.3 здавалося б, що мала величина ко-

ригуючого доданку цілком виправдовує використання спрощених вира-

зів (як наприклад, (10а)) для полегшення процедури проведення обчислень. Такий підхід дійсно може бути прийнятним, але тільки тоді, коли не висувається високих вимог до прецизійності вимірювань.

В правій частині графіка (де вертикальна складова прискорення змінюється від  $a_z \cong 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  до  $(a_z)_{\max} = 12\pi^2 \frac{L}{T_0^2} \cong 8 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ) і стає помітним відхилення залежності  $k_{yz}(a_z)$  від прямої пропорційності (пунктирна крива лінія на рис.3), при розрахунках коригуючого доданку  $k_{yz}$  необхідно користуватися повним виразом (10). Слід мати на увазі і те, що динамічний діапазон значень прискорень, вимірюваних за допомогою ІВОД, може сягати 10-ти порядків, а тому при виконанні прецизійних вимірювань підрахунки мають вестися за точними формулами і з використанням чисел відповідної розрядності.

### **Висновки**

1. Очікувані параметри вимірювача надмалих лінійних прискорень на основі ІВОД є унікальними: згідно з виразами (4б) і (6а) розрахункові порогові чутливості складають:  $\approx 10^{-12} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  та  $\approx 10^{-11} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ , відповідно, вздовж горизонтальної та вертикальної осей.

Максимальні значення прискорень, які можна виміряти вздовж тих же осей, згідно з виразами (4а) і (6б), складають:  $\approx 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  та  $\approx 10^{-1} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ .

2. Показано принципову можливість визначення неспотворених значень складових вектора прискорення вздовж усіх осей чутливості ІВОД.

Для цього розроблено метод математичної корекції вихідного сигналу ІВОД та загальний алгоритм опрацювання складових довільно орієнтованого вектора прискорення.

3. На прикладі вимірювача надмалих лінійних прискорень проведена оцінка ефективності корекції сигналів ІВОД у всьому діапазоні вимірювань. Показано, що коли значення вертикальної складової прискорення  $a_z$  не перевищують  $2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ , опрацювання сигналу ІВОД можна проводити за спрощеними формулами.

### **Перелік посилань**

1. Soref R. Tilting-mirror Fiber Optic Accelerometer / R. Soref, D. H. McMahon // Appl. Opt. – 1984. – Vol. 23. – pp. 486-491.

2. Spillman W. D. Multimode Fiber Optic Accelerometer Based on the Photoelastic Effect / W. D. Spillman // Appl. Opt. – 1982. – Vol. 21. – pp. 2653-2658.

3. 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.

4. Высокочувствительные акселерометры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zetview.com/catalog/vibrostats/icp/sense.php>

5. Демьяненко П.А. Предельные возможности аналоговых оптических датчиков в

составе ВОС / П. А. Демьяненко // Радиотехника. – 1988. – №2, с.88-90.

6. Демьяненко П. А. Прецизионный цифровой акселерометр с волоконно-оптическим датчиком / П. А. Демьяненко, Ю. Ф. Зиньковский, М. И. Прокофьев // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1997. – Том 40, №1. – с.39-47.

#### References

1. Soref R. and McMahon D. H. (1984) Tilting-mirror Fiber Optic Accelerometer. *Appl. Opt.*, Vol. 23, pp. 486-491.
2. Spillman W. D. (1982) Multimode Fiber Optic Accelerometer Based on the Photoelastic Effect. *Appl. Opt.*, Vol. 21, pp. 2653-2658.
3. Farah T., Guerlin C., Landragin A., Bouyer Ph., Gaffet S., Pereira Dos Santos F. and Merlet S. (2014) Underground Operation at Best Sensitivity Of The Mobile Lne-Syrte Cold Atom Gravimeter. *Giroskopiya i navigatsiya*, Vol. 86, No 3, pp. 3-14.(in Russian)
4. Highly sensitive accelerometers. Available at: <http://zetview.com/catalog/vibrostats/icp/sense.php>
5. 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.
6. 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.

*Дем'яненко П.О., Зиньковський Ю.Ф. Опрацювання сигналів імпульсного волоконно-оптичного давача прискорення. Розроблено алгоритм опрацювання сигналів тривимірних волоконно-оптичних давачів прискорення з імпульсною модуляцією інтенсивності оптичного потоку, яким притаманне явище взаємного впливу складових вектора прискорення, котрі спрямовані вздовж різних осей чутливості давача. Застосування розробленого алгоритму опрацювання в акселерометрах, побудованих на основі таких давачів, забезпечує отримання неспотворених значень всіх складових вектора прискорення спрямованих вздовж різних осей чутливості давача. Дана кількісна оцінка ефективності запропонованої обробки інформації для випадку проведення прецизійних вимірювань прискорення.*

**Ключові слова:** волоконно-оптичні давачі прискорення, імпульсна модуляція, волоконно-оптичні акселерометри.

*Демьяненко П.А., Зиньковский Ю.Ф. Обработка сигналов импульсного волоконно-оптического датчика ускорения. Разработан алгоритм обработки сигналов трехмерных волоконно-оптических датчиков ускорения с импульсной модуляцией интенсивности оптического потока, которым присуще явление взаимного влияния составляющих вектора ускорения, которые направлены вдоль различных осей чувствительности датчика. Применение разработанного алгоритма обработки в акселерометрах, построенных на основе таких датчиков, обеспечивает получение неискаженных значений всех составляющих вектора ускорения направленных вдоль различных осей чувствительности датчика. Дана количественная оценка эффективности предложенной обработки информации в случае выполнения прецизионных измерений ускорения.*

**Ключевые слова:** волоконно-оптические датчики ускорения, импульсная модуляция, волоконно-оптические акселерометры.

*Dem'yanenko P.O., Zinkovskiy Y.F. Signal processing of the optical fiber impulse sensor acceleration.*

*Introduction. Feature of the pulsed fiber-optic sensor is a mutual influence of the components of the acceleration vector measured. When processing the signals of the pulse sensor should provide adequate correction value counts for correct measurement results.*

*Main part. It consists of four sections.*

*The first section outlines the method of determining the undistorted values of horizontal components of the acceleration vector acting on the sensor, in the absence of the vertical component of the acceleration vector.*

*The second section outlines the method of determining the undistorted value of vertical component of the acceleration vector.*

*Based on the results obtained in the first two chapters, the third chapter described a method of determining undistorted measured quantities of all components of the acceleration vector.*

*In the fourth chapter provides a quantitative assessment of the effectiveness of the proposed information processing in the case of precision measurements of acceleration.*

*Conclusions. It is pointed to the principal possibility of determining the undistorted values of samples of the vector acceleration components along all axes of sensitivity of the pulse sensor.*

*The method of determination is proposed and a general algorithm is formulated for measuring randomly oriented components of the acceleration vector.*

*It is evaluated the efficiency of correction of pulse sensor signals for example accelerometer of micro-accelerations.*

***Keywords:** fiber-optic acceleration sensors, pulse modulation, fiber optic accelerometers.*