

- Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, Timisoara, Oct. 24-26, 2007] [Text] / Ja. Štigler // Sci. Bull. "Politehn." Univ. Timisoara. Trans. Mech. – 2007. – Vol. 52, Issue 6. – P. 83–92.
5. Воропаев, Г. А. Асимптотические оценки модельного уравнения переноса скорости диссипации турбулентной энергии [Текст] / Г. А. Воропаев, Н. Ф. Димитриева // Вісник Донецького університету. Серія А: Природничі науки. – 2008. – Вип. 1. – С. 235–240.
 6. Pezzinga, G. Local balance unsteady friction model [Text] / G. Pezzinga // Journal of Hydraulic Engineering. – 2009. – Vol. 135, Issue 1. – P. 45–56. doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2009)135:1(45)
 7. Маграквелидзе, Т. К вопросу распределения скоростей при турбулентном течении жидкости в круглой трубе [Текст] / Т. Маграквелидзе // Сб. трудов Ин-т систем упр. АН Грузии. – 2005. – № 9. – С. 96–101.
 8. Меркулов, В. И. Новые открытия и новые задачи гидромеханики [Текст] / В. И. Меркулов // Препр. Ин-т теор. и прикл. мех. СО РАН. – 2006. – № 2. – С. 1–44.
 9. Гнатів, Р. М. Розв'язок задач неусталених рухів операційним методом на основі дисипативної моделі [Текст] / Р. М. Гнатів, М. Й. Микитин // Промислова гідраліка і пневматика. – 2011. – № 3 (33). – С. 53–55.
 10. Колесников, Д. В. Дестабилизация потока в канале с изменяющимся по длине расходом [Текст] / Д. В. Колесников, О. М. Яхно, Н. В. Семинская, С. В. Стась // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 3, № 7 (69). – С. 45–49. doi: 10.15587/1729-4061.2014.24658

В роботі розглядається розробка математичної моделі кутових переміщень моноблоків лазерних гіроскопів БІНС, викликаних взаємовпливом їх вібропідвісів, та ідентифікація параметрів даної моделі. Проводиться також обґрунтування вибору структури моделі на прикладі реально існуючої БІНС. Отримані результати дозволяють досліджувати внутрішні коливальні процеси в блоці чутливих елементів та їх вплив на точність всієї системи, зменшуючи при цьому обчислювальні затрати на моделювання

Ключові слова: лазерний гіроскоп, вібропідвіс, математична модель, безплатформна інерціальна навігаційна система

В работе рассматривается разработка математической модели угловых перемещений моноблоков лазерных гироскопов БИНС, вызванных взаимовлиянием их виброподвесов, и идентификация параметров данной модели. Проводится также обоснование выбора структуры модели на примере реально существующей БИНС. Полученные результаты позволяют исследовать внутренние колебательные процессы в блоке чувствительных элементов и их влияние на точность всей системы, уменьшая при этом вычислительные затраты на моделирование

Ключевые слова: лазерный гироскоп, виброподвес, математическая модель, безплатформенная инерциальная навигационная система

УДК 681.2.084 + 001.891.573

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.42444

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВЗАЄМОВПЛИВУ ВІБРОПІДВІСІВ ЛАЗЕРНИХ ГІРОСКОПІВ В БІНС

С. В. Іванов

Кандидат технічних наук, доцент,
завідувач відділу
Науково-дослідний відділ*
E-mail: marinex@inbox.ru

Б. В. Воловик

Аспірант**
E-mail: volovukbogdan@mail.ru

І. С. Слабухін**

E-mail: lorinen@ukr.net

*Науково-дослідний інститут телекомунікацій ***

**Кафедра «Прилади та системи

керування літальними апаратами»***

***Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

В наш час в системах керування літальними апаратами широке розповсюдження отримали безплатформні інерціальні навігаційні системи (БІНС). Це пов'язано з перевагами безплатформних систем над платформними – можливістю масового виробництва, нижчою собівартістю виробництва, вищою надійні-

стю, меншим енергоспоживанням. В сучасних БІНС одним з основних функціональних елементів є інерціальний вимірювальний блок. В ньому як датчики первинної інформації використовують лазерні гіроскопи (ЛГ), що найкраще задовольняють вимоги до динамічного діапазону, стабільності масштабного коефіцієнта та надійності. Але ЛГ має суттєвий недолік – нелінійність функції масштабного коефіцієнта, що зумов-

лена синхронізацією зустрічних хвиль у резонаторі. Особливо гостро ця проблема постає, коли необхідно провести вимірювання малих кутових швидкостей.

Для зменшення зони нечутливості в ЛГ часто застосовується механічна підставка – вібропідвіс (ВП) [1]. Це технічне рішення в значній мірі зменшує переваги ЛГ і породжує велике число супутніх проблем при установці трьох гіроскопів на одній рамі в інерціальному вимірювальному блоці БІНС.

Під час роботи ВП взаємодіють між собою [2], порушуючи оптимальні режими роботи ЛГ і викликаючи просторові коливання блоку чутливих елементів (БЧЕ) БІНС. При цьому у вихідних сигналах гіроскопів і акселерометрів виникають складові, які при обробці алгоритмами БІНС призводять до появи систематичних похибок.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Проблемі зменшення зони нечутливості до малих кутових швидкостей, яка викликана синхронізацією фаз зустрічних променів в одноосному ЛГ, присвячена значна кількість патентів та публікацій. Існує багато розробок, що стосуються побудови механічної частотної підставки, а також методів керування ВП одноосного ЛГ.

Зокрема, в роботі [3] досліджено вплив різних законів керування вібропідвісом ЛГ із зашумленням на роботу одноосного ЛГ, а в статті [4] проаналізовано доцільність використання закону керування ВП із зашумленням та похибки, викликані проходженням через зону синхронізації.

Втім, небагато публікацій присвячено комбінуванню трьох ЛГ в один блок чутливих елементів (БЧЕ) і, відповідно, механічним процесам, які виникають при функціонуванні такого блоку. Однією з таких робіт є [2], де автором розглянуто реальний БЧЕ авіаційної БІНС, наведено величини похибок від взаємодії вібропідвісів ЛГ. На жаль, в [2] немає ніякого математичного та теоретичного обґрунтування отриманих похибок та процесів, які викликають дані похибки.

В статті [5] запропоновано використання структури передатних матриць для опису блоку лазерних гіроскопів БІНС та досліджено вплив зовнішніх збурень на даний блок. Авторами [5] досліджено вплив коефіцієнтів демпфування на похибки визначення положення БІНС. Недоліком публікації є те, що в ній не розглянуто процеси, викликані внутрішніми коливаннями ВП ЛГ.

В публікації [6] досліджувались спектральні щільності вихідних сигналів БІНС під дією випадкових віброзбурень, при цьому для побудови моделі блоку був використаний метод передатних матриць.

Робота [7] наводить вплив вібраційних збурень та ударів на БІНС, що розташована в динамічному середовищі, також для побудови моделі блоку використовувався метод передатних матриць. В статтях [6, 7] проводяться дослідження впливу зовнішніх збурень, проте відсутнє дослідження впливу внутрішніх коливань, породжених віброприводами ЛГ.

На сьогодні розроблено також багато систем ізоляції БЧЕ від зовнішніх вібровпливів та захисту від ударів. Подібні системи наводяться в роботі [8], де

автором пропонується використовувати різні системи віброізоляції, проте не розглядається механізм впливу вібрації на роботу ЛГ. Окрім цього дані системи вносять додаткову вагу в конструкцію БІНС, що небажано.

Найбільш повне дослідження було проведено в [9]. Автором досліджено не лише внутрішні динамічні збурення, викликані взаємовпливами ВП, а й зовнішні – прикладені до основи блоку. Також досліджено похибки, які мають місце при деформаціях рами, зокрема кінцева похибка. Але орієнтованість автора на жорстке монтування БЧЕ на об'єкт стало причиною недостатнього дослідження поведінки похибок вимірювання при використанні системи амортизації блоку. Окрім того, розглядувана консольна рама БЧЕ для установки ЛГ далека від реальних конструкцій, які в більшості своїй представляють амортизований куб.

Зі сказаного видно, що проблема взаємного впливу ВП ЛГ досліджена недостатньо. Жодним автором не розроблено модель процесів, що виникають всередині БЧЕ від взаємодії віброприводів, котра дозволила б досліджувати роботу блоку при складній формі вібрації ВП та враховувала б особливості конструкції реальної БІНС. Вирішення цього питання дозволить в подальшому алгоритмічно підвищити точність БЧЕ, що є актуальним завданням.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є розробка математичної моделі кутових переміщень моноблоків лазерних гіроскопів БІНС, викликаних взаємовпливом їх вібропідвісів, та ідентифікація параметрів даної моделі.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- отримати математичну модель переміщень, які відбуваються в блоці чутливих елементів БІНС через взаємовплив вібропідвісів трьох лазерних гіроскопів;
- провести ідентифікацію параметрів отриманої моделі кутових переміщень моноблоків.

4. Розробка структури математичної моделі блоку чутливих елементів на базі лазерних гіроскопів та її параметрична ідентифікація

4.1. Створення еталонної моделі руху вібропідвісів лазерних гіроскопів в блоці чутливих елементів

Для вирішення поставленої задачі було розроблено модель блоку чутливих елементів типу «стілець» [2] за допомогою ANSYS, з використанням числових методів розв'язання задач динаміки твердих тіл [10]. Характерною особливістю конструкції БЧЕ типу «стілець» є розміщення діагонально чотирьох амортизаторів для кріплення його на борту носія (рис. 1).

Введемо систему координат (СК) $OXYZ$, зв'язану з носієм, як показано на рис. 1. В наведених нижче викладах кутові та лінійні переміщення досліджуваних елементів БІНС виражено в цій СК, якщо не вказано інше.

В силу того, що рама БЧЕ має скінченну жорсткість, вплив на неї зовнішніх збурень призводить до появи переміщень в конструкції блоку. Середовище ANSYS дозволяє оцінити лінійні переміщення будь-якої точки заданої моделі БЧЕ.

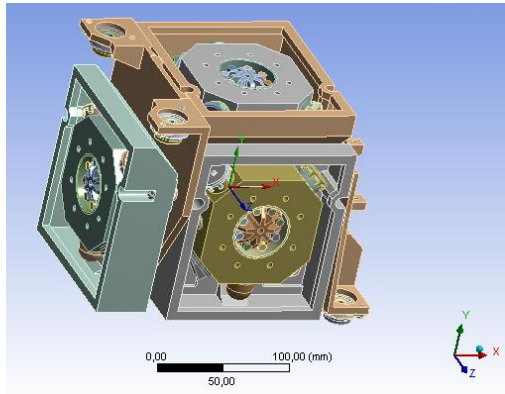


Рис. 1. Модель БЧЕ БІНС в середовищі ANSYS

Для визначення кутових переміщень моноблоків ЛГ виберемо на кожному з них три точки (рис. 2, а-в) і зв'яжемо з цими моноблоками СК, осі яких паралельні відповідним осям СК OXYZ. Оскільки ситал, з якого виготовлені моноблоки ЛГ, має більшу жорсткість, ніж решта складових БЧЕ, вважатимемо моноблок недеформованим.

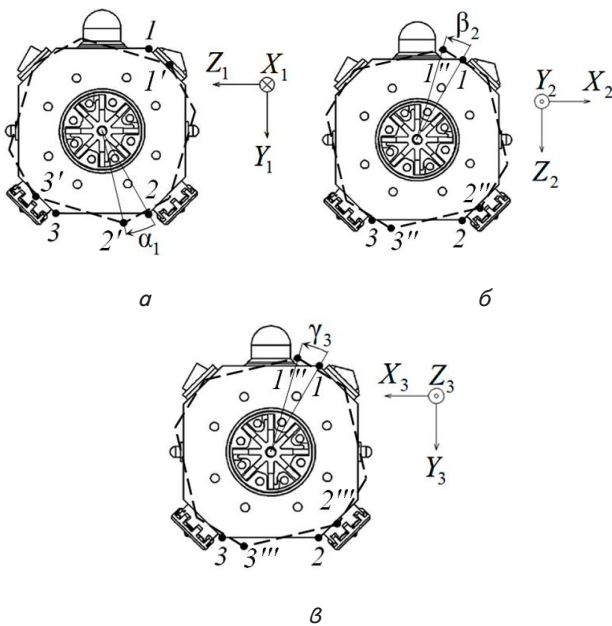


Рис. 2. Розміщення лазерних гіроскопів відносно СК O_iX_iY_iZ_i: а – ЛГ з частотою коливань 394 Гц; б – ЛГ з частотою коливань 406 Гц; в – ЛГ з частотою коливань 414 Гц

На рис. 2 через $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ позначені кутові зміщення моноблоків ЛГ відносно осей чутливості, згідно з додатнім напрямком крутного моменту. Аналогічно кутові зміщення розглядаються і відносно осей, ортогональних до осей чутливості кожного ЛГ.

Зазвичай для економії енергії на розкачування вібропідвісів ЛГ їх коливання збуджують на резонансній частоті [2]. В даній роботі розглядаються ВП з такими резонансними частотами кутових коливань відносно осей вимірювання: 394.5 Гц відносно осі OX, 406.3 Гц – відносно OY і 414.1 Гц – відносно OZ.

Позначимо через $\Delta_{ijx}, \Delta_{ijy}, \Delta_{ijz}$ лінійні переміщення кожної з трьох точок вздовж відповідних осей СК, де

при $i=1$ розглядається ЛГ з частотою коливань 394 Гц; при $i=2$ – ЛГ з частотою коливань 406 Гц; при $i=3$ – ЛГ з частотою коливань 414 Гц, а індекс $j=1..3$ відповідає номеру точки на моноблоці. Через l_{12} і l_{23} позначимо відстані між точками 1 і 2, і точками 2 і 3, відповідно. Тоді, відповідно до рис. 2, застосувавши формули тригонометрії і враховуючи мализну кутових переміщень, отримаємо формули кутових зміщень моноблоків відносно осей введених СК:

$$\alpha_1 = \sin\left(\frac{\Delta_{12y} - \Delta_{13y}}{l_{23}}\right), \beta_1 = \sin\left(\frac{\Delta_{13x} - \Delta_{12x}}{l_{23}}\right), \gamma_1 = \sin\left(\frac{\Delta_{11x} - \Delta_{12x}}{l_{12}}\right), \quad (1)$$

$$\alpha_2 = \sin\left(\frac{\Delta_{21y} - \Delta_{22y}}{l_{12}}\right), \beta_2 = \sin\left(\frac{\Delta_{23z} - \Delta_{22z}}{l_{23}}\right), \gamma_2 = \sin\left(\frac{\Delta_{22y} - \Delta_{23y}}{l_{23}}\right), \quad (2)$$

$$\alpha_3 = \sin\left(\frac{\Delta_{32z} - \Delta_{31z}}{l_{12}}\right), \beta_3 = \sin\left(\frac{\Delta_{32z} - \Delta_{33z}}{l_{23}}\right), \gamma_3 = \sin\left(\frac{\Delta_{31x} - \Delta_{32x}}{l_{12}}\right), \quad (3)$$

де $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ ($i=1..3$) – кутові переміщення моноблока відносно осей OX_i, OY_i, OZ_i, відповідно.

Для більш детального розуміння процесів, що відбуваються в БЧЕ, необхідно провести моделювання роботи системи в штатному режимі, з прикладеними до осей моноблоків ЛГ моментами на частотах, близьких до резонансних. Найбільш наглядно внесок від роботи кожного ВП в переміщення моноблоків ЛГ відображають графіки оцінки спектральних щільностей (рис. 3, а-в), які побудовані на основі отриманих кутових переміщень (1).

Аналогічні графіки можна побудувати і для двох інших моноблоків ЛГ використовуючи формули (2)–(3). Для гіроскопів з частотою збудження ВП 406 Гц і 414 Гц наведемо лише числові значення величин кутових вібрацій від взаємних впливів роботи трьох ВП ЛГ по трьох осях, які зведемо в табл. 1.

Таблиця 1

Значення амплітуд спектрів кутової вібрації моноблоків ЛГ на частотах збудження ВП

Гіроскоп, що розглядається	Вісь	Амплітуда спектру, град., на частоті збудження ВП ЛГ		
		394 Гц	406 Гц	414 Гц
ЛГ 406 Гц	OX ₂	0.017	0.01	0.006
	OY ₂	не більше 0.02	0.12	не більше 0.02
	OZ ₂	0.008	не більше 0.025	0.009
ЛГ 414 Гц	OX ₃	0.01	0.007	0.004
	OY ₃	0.015	0.006	0.004
	OZ ₃	не більше 0.01	не більше 0.025	0.1

Як видно з рис. 3 та табл. 1, на роботу кожного ЛГ впливають коливання на частотах, на яких працюють ВП ортогонально розміщених ЛГ. В цілому, амплітуди цих «паразитних» коливань при поширенні через конструкцію кубу зменшуються на порядок, але вони

все ще залишаються достатньо великими, щоб спричинити перекоси площини резонатора та викликати кінематичну похибку [9]. Як результат, відбуваються коливання осей чутливості кожного ЛГ відносно осей вимірювання БЧЕ.

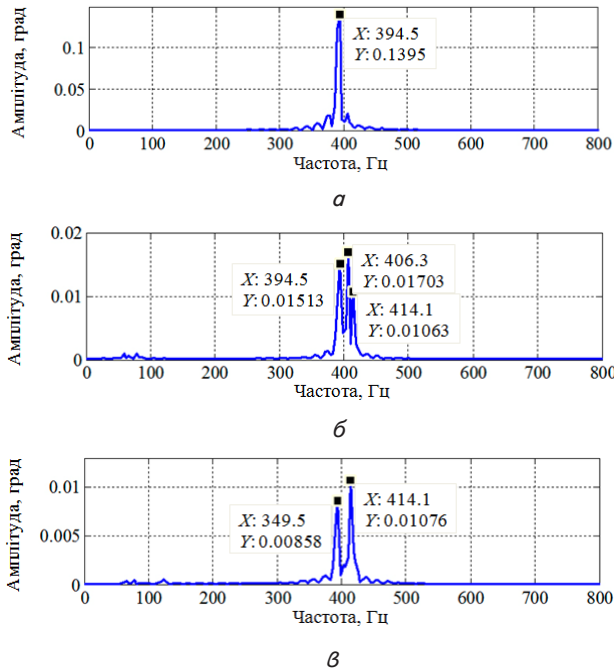


Рис. 3. Графіки спектральних щільностей для ЛГ, що коливається з частотою 394 Гц: а – вісь вимірювання OX_1 ; б – вісь OY_1 ; в – вісь OZ_1

Таким чином, модель БЧЕ типу «стілець», розроблена шляхом чисельного моделювання, дозволяє провести якісний та кількісний аналіз кутових переміщень моноблоків ЛГ. Проте, моделювання в середовищі ANSYS має наступні недоліки:

- 1) розрахунки з резонансними коливаннями ВП навколо трьох осей БЧЕ потребують значних обчислювальних затрат (розрахунок при використанні процесора Core i5-2.8 і 16 Гб RAM для 500 точок перехідного процесу займає майже 32 години);
- 2) середовище не дозволяє досліджувати модель блоку з заданими вібраційними коливаннями складної форми (наприклад, із «зашумленням»);
- 3) неможливо аналітично описати внутрішні механічні процеси в БЧЕ, які призводять до переміщень.

Саме тому виникає необхідність створення аналітичної математичної моделі БЧЕ, яка була б вільною від зазначених недоліків.

При виборі структури математичної моделі потрібно врахувати, що робота кожного ВП має вплив на інші ЛГ. Тобто потрібно виразити залежність кутових переміщень кожного ЛГ (1)–(3) від впливу кожного окремого моменту ВП.

Математичне співвідношення вихідних кутових переміщень (1)–(3) кожного з моноблоків та керуючих моментів ВП представимо наступним чином:

$$A^{<i>} = C^{<i>} \cdot M, \quad i=1..3, \quad (4)$$

де при $i=1$ розглядається ЛГ з частотою коливань 394 Гц; при $i=2$ – ЛГ з частотою коливань 406 Гц; при $i=3$ – ЛГ з частотою коливань 414 Гц; $A^{<i>} = [\alpha_i \ \beta_i \ \gamma_i]^T$ – вектор-стовпчик кутових переміщень i -го моноблоку відносно осей OX_i, OY_i, OZ_i зв'язаної СК, відповідно (вектор виходу); $C^{<i>}$ – оператор i -го моноблоку (матриця взаємовпливу 3×3); $M = [M_1 \ M_2 \ M_3]$ – вектор-стовпчик керуючих моментів кожного з трьох ВП (вихідний вектор), де M_1 – момент ВП ЛГ з частотою коливань 394 Гц, M_2 – момент ВП ЛГ з частотою 406 Гц, M_3 – момент ВП ЛГ з частотою коливань 414 Гц.

Розпишемо співвідношення (4) як:

$$\begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \\ \gamma_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\alpha_1}^{<i>} & c_{\alpha_2}^{<i>} & c_{\alpha_3}^{<i>} \\ c_{\beta_1}^{<i>} & c_{\beta_2}^{<i>} & c_{\beta_3}^{<i>} \\ c_{\gamma_1}^{<i>} & c_{\gamma_2}^{<i>} & c_{\gamma_3}^{<i>} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix}, \quad i=1..3, \quad (5)$$

де кожен елемент $c_{jk}^{<i>}$ ($i=1..3; \alpha, \beta, \gamma, k=1..3$) матриці $C^{<i>}$ являє собою залежність кутового переміщення моноблоку i -го гіроскопа навколо j -ї осі ($j=\alpha, \beta, \gamma$) зв'язаної СК від k -го моменту ($k=1..3$).

Враховуючи мализну деформацій при моделюванні роботи БЧЕ лише з одним працюючим ВП, можна використати принцип суперпозиції для отримання сумарних кутових переміщень від впливу всіх трьох моментів ВП.

Знайшовши всі елементи матриць $C^{<i>}$ можна отримати модель, котра в подальшому дозволить досліджувати вплив роботи вібропідвісів на точність всього блоку. В цьому випадку важливим питанням є вибір математичної структури кожного елемента матриці $C^{<i>}$.

БЧЕ – це багатокомпонентна механічна система, тобто кожен елемент являє собою певну динамічну ланку зі своєю передатною функцією (ПФ). Тому за своєю суттю матриця $C^{<i>}$ являє собою матрицю передатних функцій $c_{jk}^{<i>}(s)$, де s – комплексна змінна перетворення Лапласа. Ідентифікацію цих передатних функцій проведено нижче.

4. 2. Ідентифікація передатних функцій – складових елементів матриць взаємовпливу вібропідвісів лазерних гіроскопів

Будемо шукати елементи матриці $C^{<i>}$ у такій формі:

$$c_{jk}^{<i>}(s) = \frac{\sum_{r=0}^n a_r \cdot s^r}{\sum_{q=0}^m b_q \cdot s^q}, \quad (6)$$

де $a_r (r=0..n)$ і $b_q (q=0..m)$ – коефіцієнти, відповідно, чисельника і знаменника ПФ $c_{jk}^{<i>}(s)$ ($i=1..3; \alpha, \beta, \gamma, k=1..3$).

Представимо БЧЕ як «чорний ящик», тоді, згідно з [11], ідентифікацію ПФ можна провести за допомогою аналізу перехідного процесу, при цьому входом є одиничний ступінчатий сигнал.

Для ідентифікації передатної функції застосуємо аналіз перехідного процесу (реакції на одиничний стрибок моменту), тоді:

$$c_{jk}^{<i>}(s) = sY(s), \quad (7)$$

де s – комплексна змінна перетворення Лапласа, Y – зображення Лапласа вихідного сигналу – реакції системи на одиничний стрибок моменту.

При ідентифікації передатних функцій першим кроком є вибір порядку поліномів їх чисельника n і знаменника m . Оскільки, конструкція БЧЕ являє собою набір пружно деформованих тіл, то будемо вважати, що кожен елемент матриці взаємовпливу $C^{<i>}$ є набором коливальних ланок. Для детальнішого пояснення введемо наступні поняття: 1) ПФ прямого впливу – передатна функція $c_{jk}^{<i>}(s)$ матриці $C^{<i>}$, яка характеризує кутові коливання відносно осі з включеним ВП, тобто це ПФ $c_{\alpha_1}^{<i>}(s)$, $c_{\beta_2}^{<i>}(s)$, $c_{\gamma_3}^{<i>}(s)$; 2) ПФ перехресного впливу – решта елементів матриці $C^{<i>}$.

Наступним кроком є ідентифікація коефіцієнтів чисельника і знаменника ПФ, яка здійснюється за допомогою сучасних прикладних програм з використанням методів інструментальних змінних, фільтрів змінних стану (state variable filters) та їх комбінації [12]. Програма перебирає всі ці методи і вибирає метод, що забезпечує найменше значення норми похибки прогнозування [13].

Отримана математична модель кутових переміщень моноблоків лазерних гіроскопів БІНС має вид:

$$\begin{aligned} \alpha_i(s) &= c_{\alpha_1}^{<i>}(s) \cdot M_1(s) + c_{\alpha_2}^{<i>}(s) \cdot M_2(s) + c_{\alpha_3}^{<i>}(s) \cdot M_3(s) \\ \beta_1(s) &= c_{\beta_1}^{<i>}(s) \cdot M_1(s) + c_{\beta_2}^{<i>}(s) \cdot M_2(s) + c_{\beta_3}^{<i>}(s) \cdot M_3(s), \quad i = 1..3, \\ \gamma_1(s) &= c_{\gamma_1}^{<i>}(s) \cdot M_1(s) + c_{\gamma_2}^{<i>}(s) \cdot M_2(s) + c_{\gamma_3}^{<i>}(s) \cdot M_3(s), \end{aligned} \quad (8)$$

де $\alpha_i(s)$, $\beta_1(s)$, $\gamma_1(s)$ – зображення по Лапласу кутових переміщень i -го ЛГ відносно осей OX_i , OY_i , OZ_i зв'язаної СК.

З формули (8) видно, що існує можливість компенсації впливу паразитних коливань на вихідний сигнал БЧЕ по кожній з вимірювальних осей.

5. Результати розробки та ідентифікації моделі взаємовпливу вібропідвісів лазерних гіроскопів в БІНС

В ході ідентифікації було встановлено, що в конструкції БЧЕ присутні дев'ять власних частот, де три – це власні частоти вібропідвісів ЛГ, а решта – власні частоти інших елементів конструкції.

Кожна ПФ прямого впливу в матриці $C^{<i>}$ (8) буде мати знаменник десятого порядку, що відповідає п'яти послідовно з'єднаним коливальним ланкам, а ПФ перехресного впливу – знаменник чотирнадцятого порядку. Також помічено, що межа подібності фазових характеристик зміщується в бік зростання частоти при збільшенні порядку чисельника, а, оскільки, найвищою частотою, яка має вплив на роботу БЧЕ є 414 Гц, то вище цієї частоти намагатися підігнати фазові характеристики недоцільно. Внаслідок цього в ПФ прямого впливу порядок чисельника і знаменника буде рівним 11, а в ПФ перехресного впливу чисельник буде максимум 14-го порядку.

Для перевірки адекватності ідентифікованої моделі БЧЕ розрахунковій моделі ANSYS було проведено моделювання коливань за допомогою ідентифікованої математичної моделі. Слід зауважити, що в цьому випадку час моделювання зменшився від декількох десятків годин до 20–30 секунд.

На рис. 4, *a, б* зображено графіки спектральних щільностей для ЛГ з моментом ВП 394 Гц, котрі побудовані по результатам моделювання розробленої моделі БЧЕ.

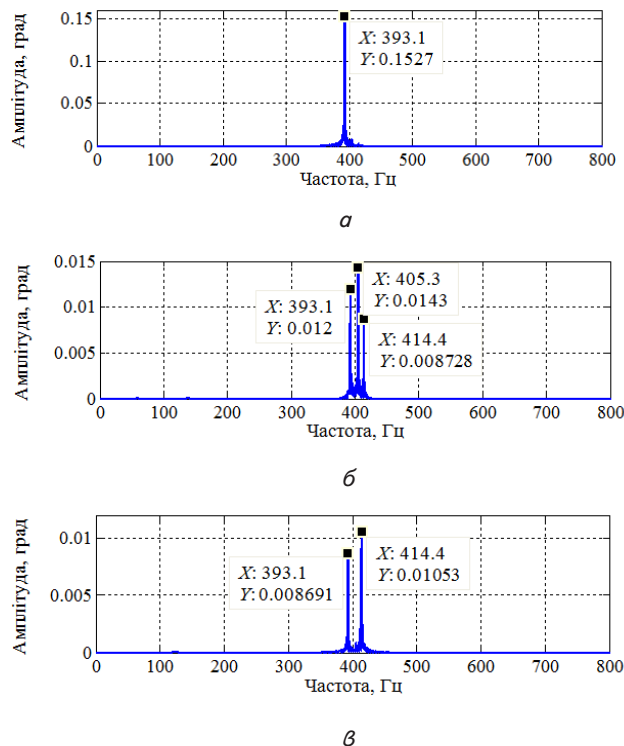


Рис. 4. Графіки спектральних щільностей для ЛГ, що коливається з частотою 394 Гц, отримані за допомогою математичної моделі БЧЕ: *a* – вісь вимірювання OX_1 ; *б* – вісь OY_1 ; *в* – вісь OZ_1

Порівнюючи рис. 3, 4, можна сказати, що якісно графіки цих спектральних щільностей співпадають. Кількісна ж відмінність для осі чутливості ЛГ складає не більше 10 % та викликана як похибками при ідентифікації, так і похибками дискретизації при побудові спектру. Таким чином, можна стверджувати, що розроблена математична модель БЧЕ є адекватною моделі в середовищі ANSYS і дозволяє при подальших експериментах замінити її.

6. Обговорення результатів розробки моделі взаємовпливу вібропідвісів лазерних гіроскопів в БІНС

В результаті досліджень була отримана загальна структура математичної моделі взаємовпливу вібропідвісів лазерних гіроскопів в БІНС, а також були ідентифіковані параметри даної моделі для реального блоку.

Порівнюючи розроблену модель із моделлю отриманою в роботі [5] можна зробити висновок, що наведена в даній статті модель краще підходить для відображення процесів взаємовпливу всередині блоку, проте в ній не розглядаються зовнішні вібровпливи. Також, на відміну від [5], в нашій моделі рама на якій закріплені гіроскопи являє собою гнучку конструкцію.

Для покращення достовірності ідентифікації моделі можна провести експеримент із встановленням на

ЛГ п'єзоелементів. Отримані в результаті дані використати для ідентифікації коефіцієнтів моделі замість даних із середовища ANSYS.

На даний момент немає експериментального підтвердження достовірності математичної моделі, проте є підтвердження достовірності моделі в середовищі ANSYS.

Дана математична модель дозволяє оцінити лінійні та кутові переміщення кожного ЛГ від внутрішніх вібровпливів під час роботи БЧЕ БІНС. Знаючи дані переміщення можна оцінити систематичні похибки БЧЕ, в тому числі – похибку кінцевого руху та похибку від зміщення осей вимірювання. На практиці це дозволить алгоритмічно компенсувати дані похибки в БІНС.

Структура отриманої математичної моделі підходить для всіх БІНС, котрі у своєму складі мають ЛГ із вібропідвісом.

Робота може використовуватись як інструкція для отримання та ідентифікації моделі взаємодії декількох фізичних тіл, розміщених на одному, пружно-м'якому об'єкті.

7. Висновки

Авторами отримано математичну модель переміщень, які відбуваються в блоці чутливих елементів БІНС через взаємовплив вібропідвісів трьох лазерних гіроскопів та проведено ідентифікацію параметрів даної моделі.

Підхід, застосований авторами, дозволив створити аналітичну модель, що описує внутрішні коливальні процеси та окремо досліджувати кожен з них як причину погіршення точності роботи БЧЕ через вплив на роботу ЛГ.

Отримана модель значно зменшує затрати часу на моделювання, що в подальшому дозволить значно полегшити дослідження роботи БІНС при варіюванні її параметрів, в тому числі параметрів рами та керуючого сигналу ВП, а також розробити ефективне керування для мінімізації похибок, викликаних взаємовпливом вібропідвісів лазерних гіроскопів.

В ході подальших досліджень планується за допомогою розробленої моделі провести оцінку кінематичної похибки, що викликана перекосами в конструкції БЧЕ.

Література

1. Aronowitz, F. Fundamentals of the ring laser gyro [Text] / F. Aronowitz. – Optical gyros and their application, 1999. – P. 3.1–3.45.
2. Леоненко, А. А. Результаты исследований взаимного влияния виброподвесов лазерных гироскопов в бесплатформенных инерциальных навигационных системах [Электронный ресурс]: Сб. докл. III Межд. науч.-техн. конф. / А. А. Леоненко // Гиротехнологии, навигация и конструирование подвижных объектов, 2001. – Режим доступа: http://www.ins-gps-team.com.ua/publications.files/publication_7_R.html. – Назв. с экрана.
3. Wang, K. The influence of noise on output of Ring Laser Gyroscopes [Text] / K. Wang, L. Yan, Q. Gu // Sensors and Actuators. – 2005. – Vol. 119, Issue 1. – P. 75–83. doi: 10.1016/j.sna.2004.09.006
4. Енин, В. Н. Погрешности лазерного гироскопа при различных схемах возбуждения виброподставки с «ошумлением» [Текст] / В. Н. Енин, М. Б. Людомирский, В. И. Санеев // Инженерный вестник : электронный научно-технический журнал. – 2013. – № 12. – С. 599–612. – Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/622102.html>. – Назв. с экрана.
5. Chen, G. Study on the Dynamics of Laser Gyro Strapdown Inertial Measurement Unit System Based on Transfer Matrix Method for Multibody System [Text] / G. Chen, X. Rui, F. Yang, J. Zhang, Q. Zhou // Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering. – 2013. – Vol. 5, Issue 0. – P. 854583–854583. doi: 10.1155/2013/854583
6. Ma, L. Power spectrum analysis for laser gyro damping system of strapdown inertial navigation [Text] / L. Ma, X. Rui, F. Yang, B. Rong // Journal of Vibration Engineering. – 2009. – Vol. 22, Issue 6. – P. 603–607.
7. Yang, F. F. Dynamical model and simulation of laser gyro strapdown inertial navigation system [Text] / F. F. Yang, X. T. Rui, L. Ma // Journal of Chinese Inertial Technology. – 2008. – Vol. 16, Issue 3. – P. 301–305.
8. Lahham, J. I. Tuned support structure for structure-borne noise reduction of inertial navigation with dithered ring laser gyros (RLG) [Text] / J. I. Lahham, D. J. Wigent, A. L. Coleman. – Position, Location and Navigation Symposium. PLANS. San Diego (USA), 2000. – P. 419–428. doi: 10.1109/plans.2000.838334
9. Кветкин, Г. А. Инструментальные погрешности измерительного блока на базе триады лазерных гироскопов при динамических возмущениях [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Г. А. Кветкин. – М., 2011. – 208 с.
10. Бруйка, В. А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench [Текст]: уч. пос. / В. А. Бруйка, В. Г. Фокин, Н. А. Солдусова и др. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
11. Гроп, Д. Методы идентификации системы [Текст] / Д. Гроп; пер. с англ.; заг. ред. Е. И. Кринецкого. – М.: Мир, 1979. – 304 с.
12. Дьяконов, В. П. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник [Текст] / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.
13. Ljung, L. Experiments With Identification of Continuous-Time Models [Text] / L. Ljung // Proceedings of the 15th IFAC Symposium on System Identification. Saint-Malo, France, 2009. – P. 9. doi: 10.3182/20090706-3-fr-2004.00195