

УДК 629.7.058

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771392020229094>

О. В. Збруцький¹, *д.т.н., професор*, **В. В. Гавриленко**², *старший викладач*, **В. Ю. Трунов**³, *аспірант*

ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІКИ ТА ПОХИБОК ВІБРАЦІЙНИХ ГІРОСКОПІВ

En The obtained generalized mathematical model of micromechanical and rotary vibrating gyroscopes as meters of angular velocity and transfer functions of meters. The features of the dynamics of vibration gyros according to the generalized model and their influence on the properties of the transfer function of the angular velocity meter are determined.

The properties of the constant error and the trend of the output signal of micromechanical gyroscopes are investigated.

Ru Получена обобщенная математическая модель микромеханических и роторных вибрационных гироскопов как измерителей угловой скорости и передаточные функции измерителей. Определены особенности динамики вибрационных гироскопов по обобщенной модели и их влияние на свойства передаточной функции измерителя угловой скорости.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

³ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Исследованы свойства постоянной погрешности и тренда выходного сигнала микромеханических гироскопов.

Вступ

Широке застосування вібраційних гіроскопів, особливо мікромеханічних (ММГ) [1 – 3], обумовлює необхідність досконалого вивчення їх динамічних властивостей. У [4 – 7] отримані математичні моделі ММГ, у [4, 6] виведена їх та роторних вібраційних гіроскопів узагальнена математична модель як вимірювачів кутової швидкості та отримані передатні функції вимірювачів у вигляді динамічної ланки другого порядку. У [5] іншими методами передатна функція знайдена у вигляді динамічної ланки першого порядку. Але у цих роботах не показано, за яких умов прийнятні ці передатні функції.

Для адекватної ідентифікації систематичних похибок вібраційних гіроскопів доцільно знати їх особливості. Відомі дослідження цих похибок [8 – 12] встановлюють їх фізичну природу виникнення. Але такі складові похибок як часовий тренд, постійна складова вихідного сигналу досліджені не повно.

Постановка задачі

Дослідимо особливості динаміки вібраційних гіроскопів та визначимо їх вплив на характеристики передатної функції вимірювача кутової швидкості, а також особливості систематичної складової похибки вихідного сигналу ММГ.

Передатні функції вібраційних гіроскопів

Складова вихідного сигналу вібраційного гіроскопа як його реакція на гармонічну кутову швидкість частоти ν має вигляд [6]

$$\langle \bar{y} \rangle = \frac{1}{2} b \cos(\nu t - \alpha), \quad (1)$$

де амплітуда

$$b = b^+ + b^- \quad (2)$$

є АЧХ датчика,

$$b^\pm = \frac{1}{2} \frac{a\Omega_0}{\sqrt{[k^2 - (\nu \pm \lambda)^2]^2 + 4n^2(\nu \pm \lambda)^2}} \quad (3)$$

λ – частота збудження коливань чутливого елемента по одній із координат (або частота власного обертання роторного вібраційного гіроскопа із пруж-

жним підвісом), яка співпадає із нижчою парціальною частотою коливань ММГ, k – вища парціальна частота ММГ (частота вільних коливань роторного вібраційного гіроскопа), $n=\zeta k$ – коефіцієнт, ζ – відносний коефіцієнт затухання коливань, α – ФХЧ гіроскопа.

Дослідимо частотні характеристики вібраційних гіроскопів, використовуючи аналітико-графічний метод, та приведемо їх до вигляду стандартизованих динамічних ланок. У [6] показано, що властивості фазо-частотної характеристики (ФЧХ) α відповідають динамічній ланці першого порядку – аперіодичній ланці. Побудуємо графіки амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) (2) у діапазоні низьких частот ν для різних значень параметрів гіроскопа. Для випадку різниці парціальних частот 20 Гц та відносних коефіцієнтах затухання 0,01; 0,1; 0,2 АЧХ b (2) та її складові b^+ , b^- (3) показані на рис. 1 – рис. 3.

Для випадку різниці парціальних частот 5 Гц АЧХ b (2) та її складові b^+ , b^- (3) показані на рис. 4.

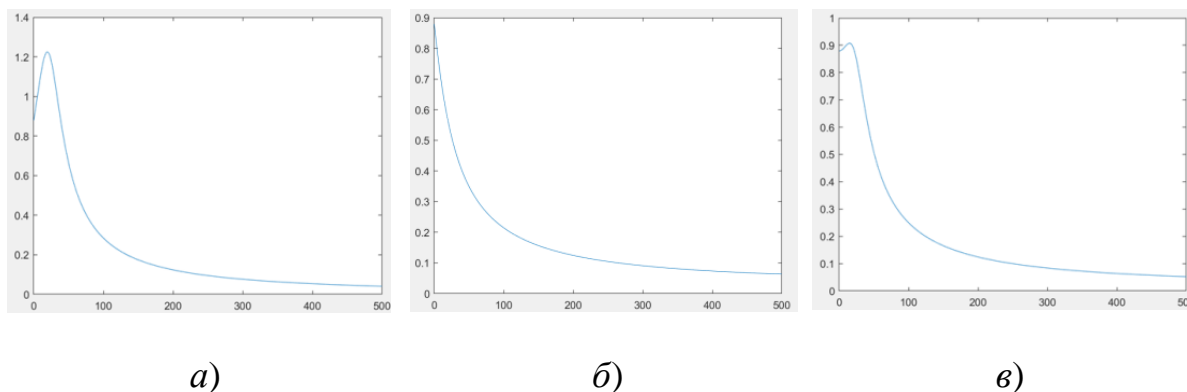


Рис. 1. Значення b^+ , (а), b^- (б) та b (в) за $\zeta=0,01$

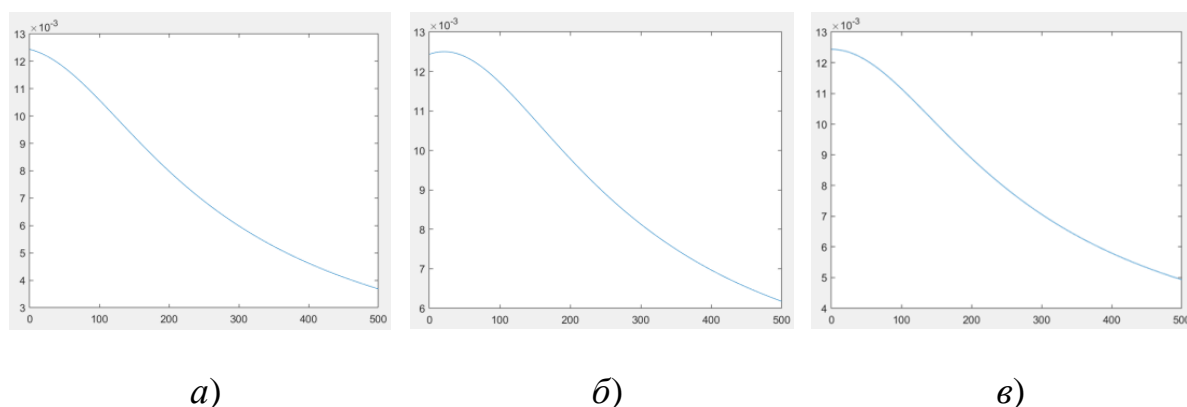


Рис. 2. Значення b^+ , (а), b^- (б) та b (в) за $\zeta=0,1$

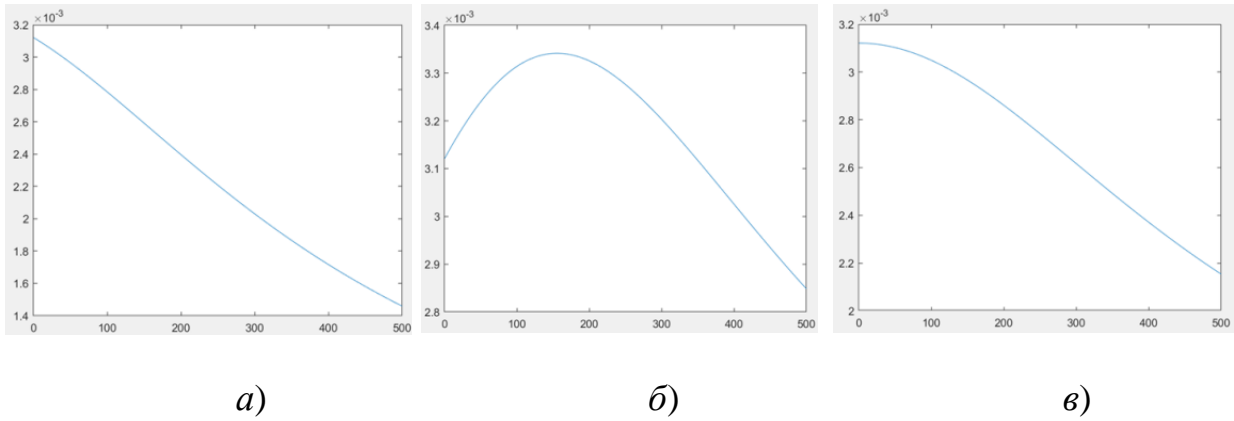


Рис. 3. Значення b^+ (а), b^- (б) та b (в) за $\zeta=0,2$

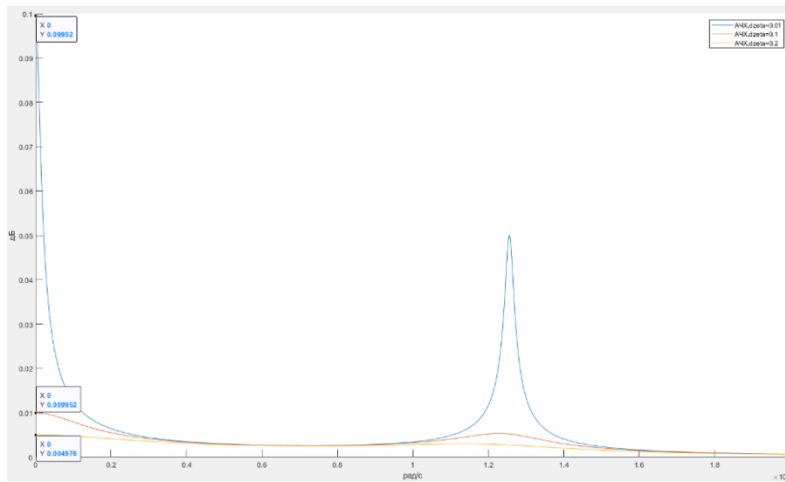


Рис. 4. Значення b^+ за різних значеннях ζ

АЧХ b (2) та її складові b^+ , b^- (3) за рівних парціальних частотах показані на рис. 5.

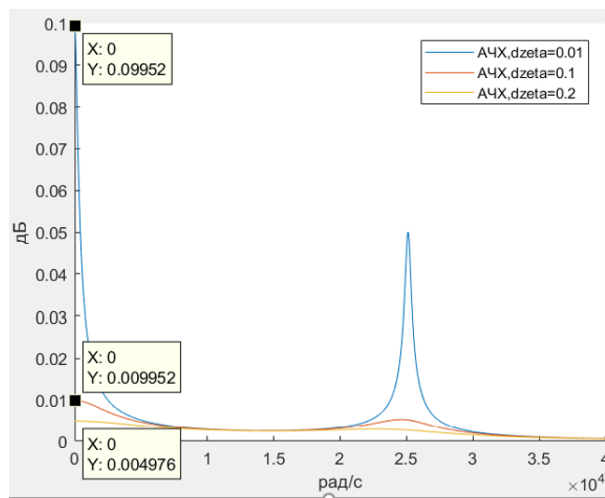


Рис. 5. Значення b^+ за різних значеннях ζ та рівних парціальних частотах

Як неважно бачити із рис. 1 – рис. 5 та отримати аналітичним дослідженням поведінки функцій (3), їх нахил (крутизна) змінюється під час наближення до вищої парціальної частоти k та залежить від значення коефіцієнта затухання коливань. У разі співпадіння парціальних частот (рис. 5) відсутня ділянка квазіпостійного значення АЧХ (коефіцієнта передачі датчика кутової швидкості). У разі незначного збільшення різниці парціальних частот (рис. 4) АЧХ має ділянку квазіпостійного значення коефіцієнта передачі. Подальше збільшення різниці парціальних частот за малих значеннях коефіцієнта затухання коливань (рис. 1, в) приводить до появи у АЧХ вимірювача кутової швидкості «резонансного» виступу та властивостей динамічної ланки другого порядку. Це зумовлене знаходженням робочої точки вимірювача на ділянці АЧХ із змінюваною кривизною. Як результат – у АЧХ вимірювача кутової швидкості практично відсутня ділянка квазіпостійного значення коефіцієнта передачі. Під час збільшення значення коефіцієнта затухання коливань АЧХ набуває вигляду АЧХ динамічної ланки першого порядку – аперіодичної ланки (рис. 2, в, рис. 3, в).

Таким чином, частотні характеристики вібраційних гіроскопів у залежності від різниці парціальних частот та значення коефіцієнту затухання коливань можуть відповідати динамічній ланці першого (аперіодичній) або другого (коливальній) порядку.

Властивості систематичної складової похибки вихідного сигналу ММГ незалежної від температури

Представимо модель вихідного сигналу ММГ у вигляді

$$U = U_0 + U_k; U_0 = U_c(t) + U_t(t) + U_{tr}(t) + W(t),$$

де U_0 – нульовий сигнал, U_c – постійна складова; U_t – температурна складова; U_{tr} – тренд; U_k – корисна складова; W – випадкова складова.

Постійна складова, температурна складова та тренд складають систематичну складову. Температурна складова компенсується завдяки відомій її залежності від температури. Температурна складова була компенсована лінійною залежністю визначеною на всьому інтервалі спостереження. У даному випадку можна говорити про ідеальну температурну компенсацію і що у отриманих даних температурна складова відсутня (або нею можна знехтувати). Розглянемо систематичну складову похибки, незалежну від температури (ССНТ) яка, таким чином, включає постійну складову та часовий тренд нульового сигналу.

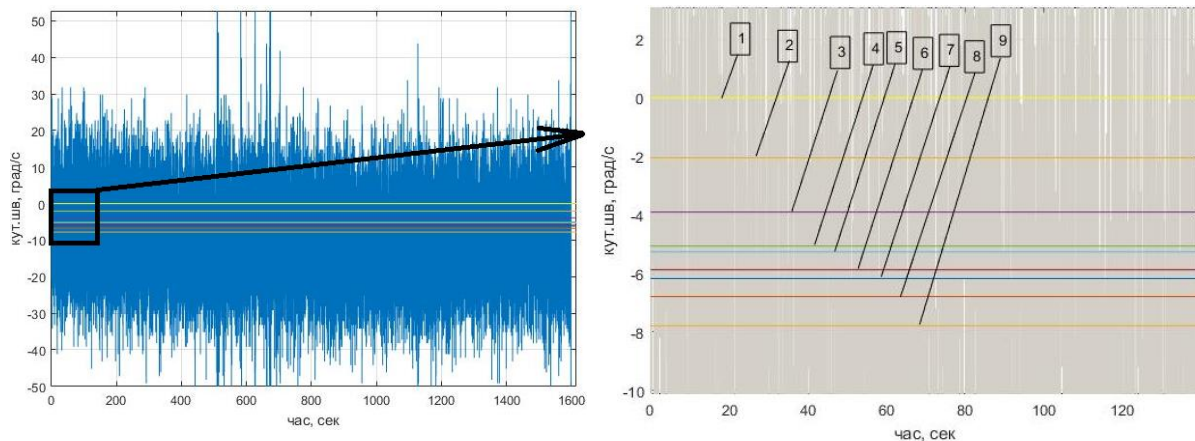
Адекватність визначення постійної складової у залежності від інтервалу спостереження

Розглянемо достовірність повноти оцінки постійної складової U_c ССНТ як її середнього значення на різних інтервалах спостереження вихідного сигналу (рис. 6, табл. 1) на початковому інтервалі часу роботи датчика на прикладі ММГ блоку чутливих елементів MPU 6050.

Таблиця 1.

Постійна складова ССНТ

Час спостереження, [с]	2	6	11	21	42	87	174	352	702
Значення постійної складової, [°/с]	1,30	2,60	3,76	3,96	4,57	4,87	5,48	6,48	7,81



а)

б)

Рис. 6. а) вихідний сигнал; б) постійна складова, визначена на інтервалах часу: крива 0 – вихідний сигнал ММГ; 2 с - лінія 1; 6 с – лінія 2; 11 с – лінія 3; 21 с – лінія 4; 42 с - лінія 5; 87 с – лінія 6; 174 с – лінія 7; 352 с – лінія 8; 702 с – лінія 9

Різні величини середнього значення U_c на різних інтервалах часу вказують на наявність часового тренду. Середнє значення вихідного сигналу стає постійним після певного часу (700 с в експерименті) (рис. 7, лінія 1). Точність апроксимації тренду (рис. 7, лінії 2) залежить від часу спостереження і збільшується з його зростанням (рис. 7, а).

Під час інтегрування вихідного сигналу ММГ, що має місце в інерціальних системах навігації, наявність постійної складової приводить до наростання похибки у часі (рис. 8, лінія 0). Наростання похибки може бути апроксимоване у першому наближенні прямою лінією, нахил якої визначається значенням постійної складової ССНТ. У залежності від достовірності оцінки постійної складової (табл. 1) лінії апроксимації проінтегрованого

Прилади та методи контролю

сигналу будуть різними (рис. 8, лінії 1...8). Адекватною є оцінка постійної складової ССНТ на найдовшому інтервалі спостереження (рис. 8, лінія 9) (табл. 1).

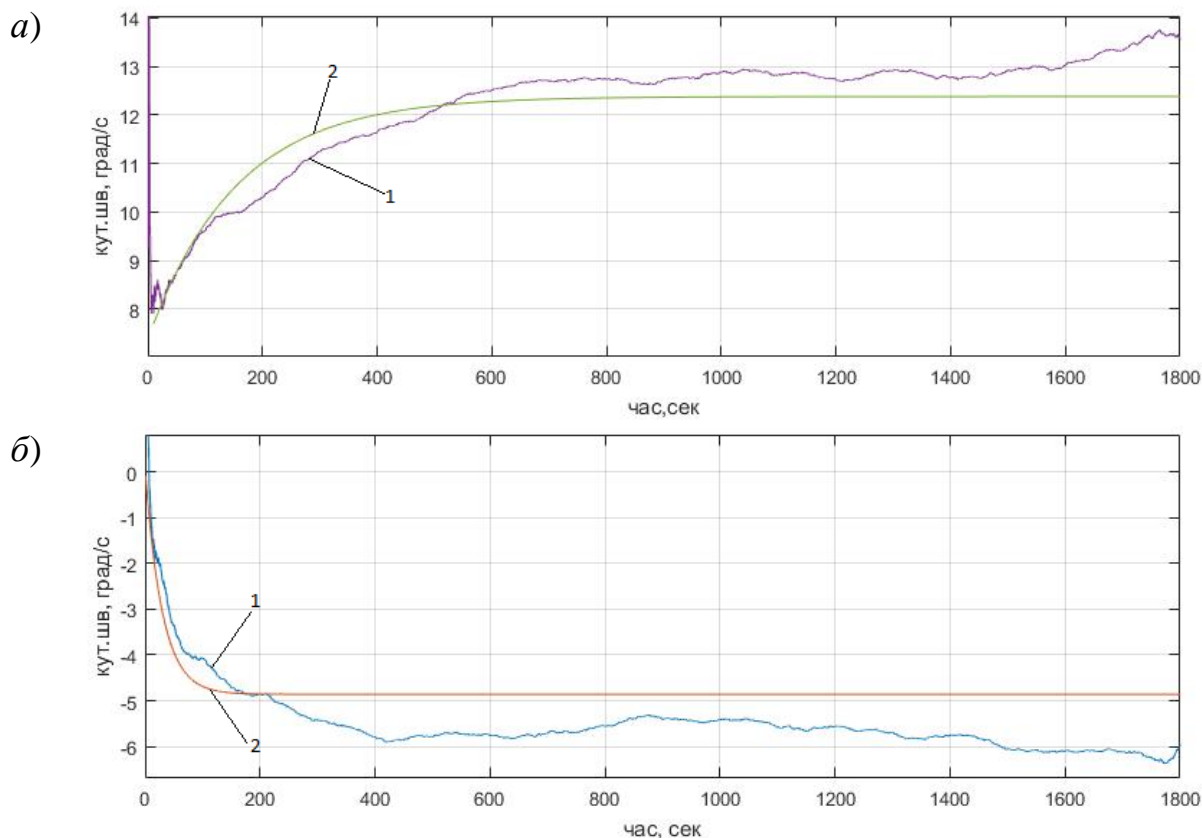


Рис. 7. Тренд вихідного сигналу (крива – 1) із описаним трендом у вигляді експоненти (крива – 2), а) запуск 1, б) запуск 2

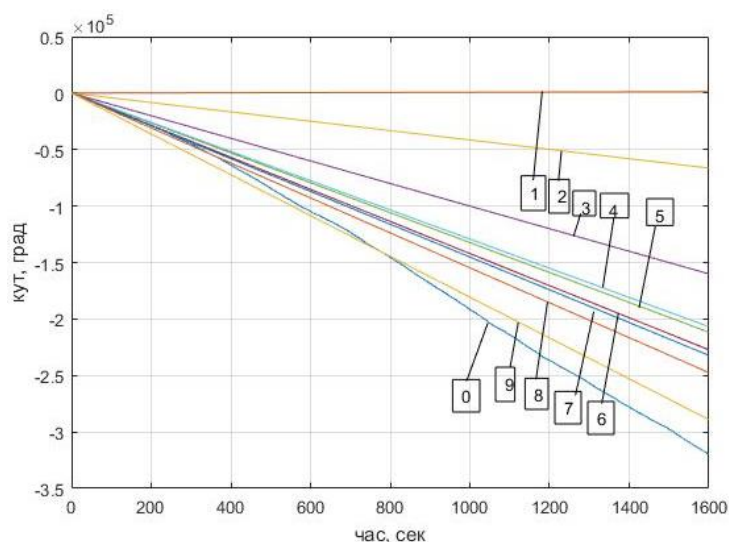


Рис. 8. Апроксимація проінтегрованого нульового сигналу лінійним рівнянням від часу. Крива 0 – проінтегрований нульовий сигнал; лінія 1 – за 2 с; лінія 2 – за 6 с; лінія 3 – за 11 с; лінія 4 – за 21 с; лінія 5 – за 42 с; лінія 6 – за 87 с; лінія 7 – за 174 с; лінія 8 – за 352 с; лінія 9 – 702 с

Зміна значення постійної складової ССНТ гіроскопа у різних запусках

Експериментальні дослідження показали, що значення постійної складової ССНТ гіроскопа змінюється від запуску до запуску (табл. 2).

Таблиця 2.

Значення постійної складової ССНТ у різних запусках за 352 с

Запуск	1	2	3	4	5	6
Значення постійної складової, %с	2,87	0,72	0,27	10,75	-10,58	-5,64

Порівняння властивостей ССНТ групи гіроскопів у одному запуску

Порівнюємо значення постійної складової ССНТ декількох ММГ однієї партії в одному запуску. Експериментальні дані для вибірки із 18 ММГ свідчать, що значення постійних складових для різних ММГ різні за величиною та мають різні знаки (табл. 3).

Таблиця 3.

Значення ССНТ у одному запуску

№ за- пуску	ССНТ датчика, %с												
	1	2	3	4	...	8	...	11	...	15	16	17	18
1	-30,33	3,62	-6,68	-1,72	...	-4,42	...	0,77	...	2,01	0,64	-1,83	0,09
2	-39,98	2,79	-14,88	-0,51	...	1,87	...	1,88	...	-2,06	-5,33	-4,26	0,00
3	-42,77	3,23	-18,61	1,90	...	2,07	...	0,47	...	-1,72	-1,35	-6,02	-2,76
4	-37,61	-0,20	-15,92	0,49	...	-1,56	...	3,72	...	0,35	-0,98	-2,56	-1,82
5	-41,16	1,81	-17,87	-0,12	...	-3,78	...	-2,95	...	-2,76	0,58	-2,67	-2,19
6	-44,02	3,37	-18,27	1,10	...	-2,43	...	6,33	...	-1,04	1,88	-0,11	-2,32
7	-39,53	-0,73	-15,78	-2,14	...	2,60	...	4,17	...	-4,82	-4,90	-0,37	1,82
8	-38,27	1,90	-14,69	0,41	...	-1,18	...	2,75	...	1,60	-1,21	0,06	-5,27
9	-42,35	1,38	-15,99	0,07	...	-3,01	...	0,83	...	-5,57	0,38	1,09	-1,58
10	-44,82	0,35	-19,25	1,01	...	-0,38	...	-0,35	...	-3,25	0,28	-0,90	-0,60

Розподіл постійних складових за знаком наближається до нормального (рис. 10, а, рис. 10, б). Збільшення кількості датчиків приводить до наближення рівної кількості похибок обох знаків

Розподіл постійних складових за знаком наближається до нормального (рис. 10, а, рис. 10, б). Збільшення кількості датчиків приводить до наближення рівної кількості похибок обох знаків

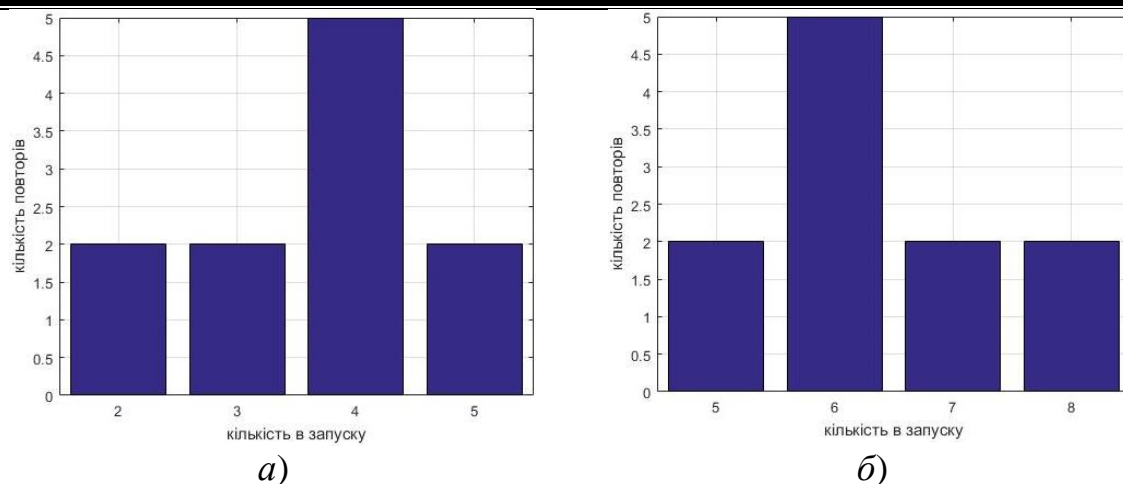


Рис. 10. Розподіл додатних (а) і від'ємних (б) значень похибки у запусках групи датчиків

У 50% датчиків знак похибки може змінюватись від запуску до запуску, в інших ММГ даного типу знак залишається постійним (табл. 3).

Досліджено закономірності адекватного прогнозування похибки мікромеханічного гіроскопа шляхом апроксимації проінтегрованого вихідного сигналу степеневим поліномом від часу спостереження та його початку, що дає можливість його корекції-компенсації та підвищення точності, встановлено, що під час «холодного» включення датчика інтервал адекватного прогнозування похибки та корекції складає 25 % часу спостереження.

Досліджені статистичні характеристики випадкової складової вихідного сигналу (спектральна щільність, кореляційна функція) однотипних мікромеханічних гіроскопів та встановлена їх подібність, що дозволило запропонувати спільну обробку випадкової похибки групи однотипних мікромеханічних гіроскопів. Показано, що статистична обробка вихідних сигналів 7 – 10 мікромеханічних гіроскопів дозволяє зменшити середнє значення випадкової похибки та її середньоквадратичне відхилення, тобто підвищити точність вимірювання на 1,5 порядки.

Отримані результати дозволяють запропонувати алгоритми їх компенсації у режимі передстартової калібровки та на скінченному (не малому) інтервалі часу роботи датчика.

Висновки

У двоступеневих мікромеханічних гіроскопах різних кінематичних схем амплітудно-частотна характеристика може відповідати коливальній, або аперіодичній динамічним ланкам. Така дуальність залежить від різниці парціальних частот гіроскопа. Ця різниця також визначає полосу пропускання гіроскопа, на якій коефіцієнт перетворення може зберігати постійне значення в заданому інтервалі допуску.

Дослідженням властивостей амплітудно-частотної характеристики узагальненої моделі вібраційних гіроскопів встановлено, що у разі незначної різниці парціальних частот гіроскопів, як і за їх співпадінні, амплітудно-частотна характеристика вимірювача кутової швидкості має властивості амплітудно-частотної характеристики динамічної ланки першого порядку. У разі співпадіння парціальних частот відсутня ділянка квазіпостійного значення коефіцієнта передачі. Під час незначного збільшення різниці парціальних частот амплітудно-частотна характеристика має ділянку квазіпостійного значення коефіцієнта передачі.

Подальше збільшення різниці парціальних частот приводить до появи у амплітудно-частотній характеристиці вимірювача кутової швидкості «резонансного» виступу та властивостей динамічної ланки другого порядку. Це зумовлене знаходженням робочої точки вимірювача на ділянці амплітудно-частотної характеристики зі змінюваною кривизною. Як результат – в амплітудно-частотній характеристиці практично відсутня ділянка квазіпостійного значення коефіцієнта передачі.

Точність визначення постійної складової систематичної складової похибки вихідного сигналу, незалежної від температури, збільшується зі збільшенням часового інтервалу осереднення, а значення постійної складової може змінюватись випадковим чином від включення до включення як по величині, так і по знаку. Найбільшу похибку при визначенні постійної складової на початковому інтервалі часу вносить тренд. Динаміка тренду може бути описана показниковою функцією, параметри якої можна ідентифікувати на початковому інтервалі спостереження.

Систематичні складові похибки вихідного сигналу гіроскопа у запусках як і групи гіроскопів в одному запуску, мають якісно однаковий характер, але можуть відрізнятись за знаком.

Список використаної літератури

1. *E. Gai*. Guiding munitions with micromechanical INS/GPS system// Интегрированные системы навигации. Сб. статей. – СПб.-2004. – С. 101-109.
2. *W. Geiger, J. Freuch, M. Bramaier etc.* Daved – LL – a novel gyroscope in SOI – technology // Symposium Gyro Technology. – 2001. – Stuttgart. – р. 5.0 - 5.8.
3. *Коновалов С. Ф., Кулешов А. В., Носов Н. А., Подчезерцев В. П., Фатеев В. В., Фролов Е. Н., Квон К. Б., Нам С. В.* Вибрационные датчики угловой скорости // 10 Санкт-Петербургская международ. конф. по интегрированным навигационным системам.-2003. – С. 261 - 271.
4. *Збруцький А. В., Гавриленко В. В., Стеценко Т. В.* Измерение угловых перемещений выбрационными гироскопами// Вісник Черкаського держ. техн. ун-ту. Спецвипуск. –2006. –С. 29-35.

5. *Apostolyuk V.* Coriolis Vibratory Gyroscopes: Theory and Design // Springer (USA) . – 2015. – 117 p.
6. *Збруцький О. В.,* Гавриленко В. В., Стеценко Т. В. Динамічні характеристики механічних вібраційних гіроскопів як сенсорів навігаційних систем // Наукові вісті. НТУУ"КПІ". – 2000. – №6. – С. 103-109.
7. *Матвеев В. В.,* Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем // СПб.; ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». – 2009. – 280 с. ISBN 978-5-900780-73-3.
8. *Некрасов Я. А.* Методы повышения точности съема информации в микромеханических гироскопах // СПб. – 2007г. – 126с.
9. *Nassar S.,* Schwarz K. P., El-Sheimy N. INS and INS/GPS Accuracy Improvement Using Autoregressive Modeling of INS Sensor Errors // Proceedings of the ION NTM. – San Diego., CA, USA. – 26-28 January 2004. – P. 936-944.
10. *Shorin V. S.,* Nikishin V. B., Panasenko S. Y. Evaluation and compensation of a micromechanical gyro drift in pipeline geometry tool // 20th St-Peterburg ICINS. –2014. – P. 163-166.
11. *Chumakin E. A.,* Mishin A. Y. The investigation of attitude determination sensors performance for evaluation of their possible use in inertial guidance systems for uninhabited air vehicles // 16th St-Peterburg ICINS. –2009. – P. 128-133.
12. *Xue L.,* Yuan W., Chang H., Jiang C. MEMS-Based Multi-Sensor Integrated Attitude Estimation Technology for Mav Applications // Proceedings of the IEEE NEMS. – Shenzhen, China. – 5–8 January 2009. – P. 1031-1035.

Spysok vykorystanoi literatury

1. *E. Gai.* Guiding munitions with micromechanical INS/GPS system// Integrirovannyye sistemyi navigatsii. Sb. statey. – SPb.-2004. – S. 101-109.
2. *W. Geiger, J. Freuch, M. Bramaier etc.* Daved – LL – a novel gyroscope in SOI – technology // Symposium Gyro Technology. – 2001. – Stuttgart. – p. 5.0 - 5.8.
3. *Konovalov S. F.,* Kuleshov A. V., Nosov N. A., Podchezertsev V. P., Fateev V. V., Frolov E. N., Kvon K. B., Nam S. V. Vibratsionnyie datchiki uglovyoy skorosti // 10 Sankt-Peterburgskaya mezhdunarod. konf. po integrirovannym navigatsionnyim sistemam.-2003. – S. 261 - 271.
4. *Zbrutskiy A. V.,* Gavrilenko V. V., Stetsenko T. V. Izmerenie uglovyih peremescheniy vyibratsionnyimi giroskopami// Visnyk Cherkaskogo derzh. tehn. un-tu. Spetsvipusk.
5. *Apostolyuk V.* Coriolis Vibratory Gyroscopes: Theory and Design // Springer (USA) . – 2015. – 117 p.

6. *Zbrutskiy O. V., Gavrilenko V. V., Stetsenko T. V.* Dinamichni harakteristiki mehanichnih vibratsiynih giroskopiv yak sensoriv navigatsiynih sistem // NaukovI vIstI. NTUU"KPI". – 2000. – №6. – S. 103-109.
7. *Matveev V. V., Raspopov V. Ya.* Osnovyi postroeniya besplatformen-nyih inertsiialnyih navigatsionnyih sistem // SPb.; GNTs RF OAO «Kontsern «TsNII «Elektropribor». – 2009. – 280 s. ISBN 978-5-900780-73-3.
8. *Nekrasov Ya. A.* Metodyi povysheniya tochnosti s'ema informatsii v mikromekhanicheskikh giroskopah // SPb. – 2007г. – 126s.
9. *Nassar S., Schwarz K. P., El-Sheimy N.* INS and INS/GPS Accuracy Improvement Using Autoregressive Modeling of INS Sensor Errors // Proceedings of the ION NTM. – San Diego., CA, USA. – 26-28 January 2004. – P. 936-944.
10. *Shorin V. S., Nikishin V. B., Panasenko S. Y.* Evaluation and compensation of a micromechanical gyro drift in pipeline geometry tool // 20th St-Peterburg ICINS. – 2014. – P. 163-166.
11. *Chumakin E. A., Mishin A. Y.* The investigation of attitude determination sensors performance for evaluation of their possible use in inertial guidance systems for uninhabited air vehicles // 16th St-Peterburg ICINS. – 2009. – P. 128-133.
12. *Xue L., Yuan W., Chang H., Jiang C.* MEMS-Based Multi-Sensor Integrated Attitude Estimation Technology for Mav Applications // Proceedings of the IEEE NEMS. – Shenzhen, China. – 5–8 January 2009. – P. 1031-1035.