

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ГОЛОВАЧ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 629.058: 623.465.34:531.383

**МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ ТА КАЛІБРУВАННЯ
БЕЗПЛАТФОРМЕННИХ ІНЕРЦІАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність: 05.11.03 – гіроскопи та навігаційні системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України та на Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал».

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
АВРУТОВ Вадим Вікторович
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри приладів і систем орієнтації і навігації

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
ЧИКОВАНІ Валерій Валеріанович
Національний авіаційний університет, професор кафедри систем управління літальних апаратів

доктор технічних наук, доцент
УСПЕНСЬКИЙ Валерій Борисович
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем

Захист відбудеться «26» травня 2017 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.07 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп.1, ауд.317.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « » квітня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю.В. Киричук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Створення ефективних методів випробувань та калібрування безплатформенних інерціальних навігаційних систем (БІНС) є однією з найбільш важливих задач для розробки і виробництва. Такі методи дозволяють визначати характеристики приладів, а також використовуються для контролю якості і працездатності виготовлених зразків, вивчення потенційних можливостей виробів, які знаходяться у процесі розробки або на стадії автономних випробувань, моделювання рішень навігаційних завдань конкретним приладом з відомими характеристиками, підвищення точності вимірювань БІНС шляхом корекції вихідних сигналів вимірювальних каналів.

Методи випробувань і калібрування для БІНС розробляються з урахуванням таких факторів, як клас точності і призначення БІНС, доступне випробувальне та вимірювальне обладнання, існуючі методи та алгоритми аналізу даних, норми регіональних і міжнародних стандартів. Основою найбільш складних методів випробувань, за допомогою яких можливо не тільки перевірити працездатність приладу, але й оцінити параметри точності його вимірювань є теоретично обґрунтований набір алгоритмів для роботи з даними, накопиченими у процесі лабораторних випробувань. У результаті виконання таких алгоритмів визначаються параметри БІНС, які у залежності від виду випробувань, при яких вони були отримані, визначають технічні характеристики системи у цілому.

У дисертаційній роботі вирішується проблема вдосконалення та розробки методів випробувань і калібрування для підвищення точності визначення параметрів детермінованих і випадкових процесів у вихідних сигналах БІНС, яка призначена для початкової виставки рухомого наземного об'єкта в умовах статички.

Актуальність роботи полягає у науковому обґрунтуванні розроблених та удосконалених методів випробовування та калібрування для визначення параметрів БІНС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі приладів і систем орієнтації та навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та на КП СПБ «Арсенал» відповідно до пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок, що затверджені у постанові КМУ №942 від 7 вересня 2011 р: «Нові апаратні рішення для перспективних засобів обчислювальної техніки, інформаційних та комунікаційних технологій» та «Інтелектуальні інформаційні та інформаційно-аналітичні технології». Робота виконувалась у відповідності до задач основного науково-технічного напрямку досліджень КП СПБ «Арсенал» зі створення безплатформенних інерціальних навігаційних систем наземного та бортового застосування.

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка і наукове обґрунтування нових методів випробовування та калібрування для підвищення точності і ефективності визначення параметрів БІНС.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних задач:

1. Виконати огляд існуючих методів випробовування та калібрування для БІНС і інерціальних датчиків. Класифікувати і теоретично обґрунтувати вибір

методів випробувань і калібрування для досліджуваної БІНС з урахуванням її призначення;

2. Проаналізувати точностні параметри існуючих варіантів БІНС і інерціальних датчиків навігаційного класу точності;

3. Розробити і теоретично обґрунтувати вдосконалені методи випробувань, вибрані для досліджуваної БІНС;

4. Розробити і теоретично обґрунтувати алгоритми калібрування тривісних блоків (ТБ) акселерометрів (АК) і лазерних гіроскопів (ЛГ);

5. Розробити алгоритми корекції помилок детермінованих процесів вихідних сигналів блоків інерціальних датчиків для перевірки і експериментального відпрацювання методів випробувань та калібрування;

6. Оцінити ефективність застосування розроблених методів випробувань та калібрування шляхом експериментальних досліджень;

7. Впровадити результати досліджень.

Об'єкт досліджень – БІНС високого класу точності для наземних рухомих об'єктів, датчики лазерних гіроскопів і маятникових акселерометрів, що входять до її складу.

Предмет досліджень – методи випробувань та калібрування БІНС для визначення і компенсації похибок, що виникають при роботі у статичних умовах.

Методи дослідження: Для отримання результатів використовувались методи дискретної математики, математичної статистики, диференціального обчислення функцій, метод варіації Алана, методи аналізу на основі вейвлет-перетворень, швидкого перетворення Фур'є, метод найменших квадратів, методи апроксимації та інтерполяції даних. Для обґрунтування ефективності розроблених методів дослідження випадкових похибок випробувань використовувались методи імітаційного і статичного моделювання. Розроблені та удосконалені методи перевірялись шляхом експериментальних досліджень у лабораторних умовах з виготовленими зразками БІНС.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

1. Удосконалено метод визначення випадкових похибок лазерних гіроскопів за допомогою варіації Алана шляхом застосування вейвлет-перетворень;

2. Удосконалено метод визначення випадкових похибок акселерометрів по варіації Алана до проведення темперних випробувань шляхом використання моделі температури саморозігріву БІНС;

3. Розроблено новий метод алгоритмічної компенсації температурного дрейфу параметрів сигналів тривісного АК;

4. Розроблено метод стендового калібрування ТБ АК і ЛГ у якому зменшено кількість випробувань за рахунок застосування апарату алгебри кватерніонів. Розроблено та обґрунтовано алгоритм корекції вихідних сигналів вимірювальних каналів інерціальних датчиків на основі визначених параметрів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що створено та обґрунтовано нові методи випробувань і калібрування БІНС. Зокрема, розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення для обробки даних ТБ інерціальних датчиків

у складі БІНС, розроблена методика, алгоритми і програмне забезпечення стендового калібрування ТБ ЛГ і АК, розроблено методику, алгоритм і програмне забезпечення для визначення параметрів температурної залежності сигналів тривісного АК, розроблені алгоритми і програмне забезпечення для визначення параметрів випадкових процесів ЛГ і АК, розроблені алгоритми корекції похибок детермінованих процесів вихідних сигналів ЛГ і АК. Результати розробок впроваджені на підприємстві КП СРБ «Арсенал» у процеси досліджень та випробувань модулів інерціальних датчиків для БІНС.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно отримано основні положення, які винесені на захист (розроблено методичне забезпечення стендового калібрування і алгоритм корекції вихідних сигналів вимірювальних каналів інерціальних датчиків на основі визначених параметрів; удосконалено метод визначення параметрів стохастичних процесів гіроскопів методом варіації Алана із застосуванням вейвлет-перетворень; удосконалено метод визначення параметрів стохастичних процесів АК шляхом врахування температури саморозігріву; розроблено метод алгоритмічної компенсації температурного дрейфу зміщення нуля і масштабного коефіцієнта для вимірювальних каналів ТБ АК). Самостійно розроблені методики лабораторних випробувань, алгоритми визначення параметрів БІНС. За безпосередньої участі автора розроблені методики і проведені експериментальні дослідження калібрування ТБ ЛГ і АК.

У роботах виконаних у співавторстві, безпосередньо автором виконано:

[2] – аналітичний розрахунок допустимих відхилень контрольованих параметрів для використання в алгоритмі скалярної діагностики інерціального вимірювального модуля; [4] – розроблено алгоритм корекції вихідного сигналу акселерометра, виконано експериментальні дослідження по застосуванню розробленого методу калібрування для тривісних АК у лабораторних умовах; [6] – обґрунтовано метод скалярного калібрування, розроблено математичну модель вихідних сигналів інерціально-вимірювального модуля, розроблено алгоритм калібрування ТБ акселерометрів і гіроскопів; [7] – запропоновано блочний підхід розв’язку рівнянь скалярного калібрування; [9] – виконана аналітична оцінка похибки скалярною калібрування; [11] – виконано експериментальне дослідження випадкових процесів і визначення точностних параметрів лазерного гіроскопа.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі приладів і систем орієнтації та навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» та на КП СРБ «Арсенал» під керівництвом к.т.н., доцента Аврутова В.В. Робота є результатом самостійних досліджень С.В. Головача.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на таких конференціях, конгресах, з’їздах, семінарах, нарадах: XIX Санкт-Петербурзькій міжнародній конференції по інтегрованим навігаційним системам, м. Санкт-Петербург, 2012 р.; XIV Міжнародній молодіжній наук.-техн. конференції «Людина і Космос». – м. Дніпропетровськ, 2012 р.; міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 60-річчю вищої освіти в м. Коврові. – м. Ковров, 2013 р.; на

міжнародних наук.-техн. конференціях «Приладобудування. Стан і перспективи 2012», «Приладобудування. Стан і перспективи 2013», «Приладобудування. Стан і перспективи 2014», «Приладобудування. Стан і перспективи 2015», м. Київ; VII науково-технічній конференції аспірантів та молодих вчених з міжнародною участю. – м. Ковров, 2015 г; 2-й Українській науково-технічній конференції «Спеціальне приладобудування: стан та перспективи», 2016 р.

Результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Публікації. За темою дисертаційних досліджень опубліковано 13 наукових праць, у тому числі п'ять статей у фахових виданнях, з них 5 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних, дві статті у матеріалах міжнародних конференцій, шість тез доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура й обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, переліку посилань зі 123 назв. Загальний обсяг дисертації становить 172 сторінок, 52 рисунків, 16 таблиць та 6 додатків на 18 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання досліджень, наведені дані про наукову новизну, практичну цінність і впровадження отриманих результатів, дані про публікації та апробацію результатів досліджень, показано зв'язок роботи з науковими програмами і проектами.

У першому розділі виконано аналітичний розгляд методів випробувань та калібрувань безплатформених інерціальних навігаційних систем, виконано аналіз точностних характеристик та особливостей сучасних інерціальних датчиків і основні впливи зовнішніх факторів на БІНС високого класу точності призначеної для наземного застосування в умовах статички.

Процес налаштування високоточних БІНС для роботи з необхідною точністю ґрунтується на визначенні її параметрів у процесі реалізації випробувань та калібрувань. Такий процес потребує значної кількості часу та обладнання, а також наявність теоретично обґрунтованих методів визначення параметрів для таких систем. Ефективні методи випробувань та калібрувань дозволяють зменшити витрати на їх проведення та забезпечити визначення параметрів БІНС з необхідною точністю. Параметри, що необхідно визначити в процесі випробувань та калібрувань характеризують стохастичні та детерміновані похибки вимірювальних каналів БІНС. Параметри стохастичних похибок дозволяють зробити оцінку граничної точності вимірювання БІНС. У свою чергу покращення точності роботи БІНС до потенційно можливої досягається ефективним визначенням та врахуванням детермінованих похибок у коректуючи ланках її вихідних сигналів. У розділі розглянуто дві основні сучасні класифікації випробувань. Найчастіше випробування приладів поділяють на оціночні, прийомочні та випробування надійності. Серед зазначених прийомочні випробування для інерціальних датчиків включають тільки ті методи, що

дозволяють отримувати експериментальним шляхом необхідні для застосування у роботі БІНС параметри стохастичних та детермінованих похибок. Випробування інерціальних датчиків за методами і умовами проведення можна поділити на статичні, калібрувальні та динамічні. У результаті аналізу основних діючих факторів на БІНС, яка застосовується в умовах статики на наземних об'єктах для дослідження було обрано статичні та калібрувальні випробування як такі, що задовольняють рівню прийомочних. Методами випробувань та калібрувань, що є об'єктом дослідження роботи, у результаті інформаційно-аналітичного огляду стану проблеми обрано статичні випробування БІНС у нормальних умовах, температурні випробування тривісного АК у складі БІНС та скалярне калібрування ТБ ЛГ і АК.

Порівняльний огляд сучасних інерціальних датчиків за основними точностними параметрами показав, що датчики які досліджувались у роботі відповідають рівню датчиків високого (навігаційного) класу точності. До таких датчиків у даній роботі відносяться ЛГ серійного виробництва RL-28 та АК АКС-08 (КП СПС «Арсенал», Україна). Таким чином БІНС, що розглядається у даній роботі і побудована на основі таких датчиків можна вважати системою навігаційного класу точності.

Другий розділ присвячено побудові математичної моделі БІНС, що описує формування вихідних первинних сигналів вимірювальних каналів інерціальних датчиків на основі яких вирішуються навігаційні задачі.

В результаті аналізу складу досліджуваної БІНС, та принципу її функціонування було обґрунтовано, що основним джерелом первинної інформації такої системи являються вимірювання прирощення кутів повороту для ЛГ, та вимірювання зміни прирощення проекцій вектора удаваної швидкості (або інтеграла від проекції удаваного прискорення).

Для розробки методів випробувань та калібрувань було запропоновано математичну модель БІНС, що базується на первинних вихідних сигналах інерціальних датчиків ЛГ та АК.

Вихідний сигнал ЛГ має наступну модель:

$$\varphi_n(\Delta t) = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \{[1 + \varepsilon + K_{NL}(\omega)]\omega + B_{0g} + R_{\varphi i} \cdot \xi(\tau)\} d\tau + \dots$$

$$\dots + \alpha_m [\sin(f t_n) - \sin(f t_{n-1})] + q_\theta \cdot \eta(t_n),$$

де $\Delta\varphi_n$ – прирощення кута на інформаційному виході ЛГ, за час Δt ; $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ – період опитування ЛГ (t_n – момент закінчення n -го опитування; $n = 1, \dots, N$ – його поточний номер; ω – проекція вектора абсолютної кутової швидкості обертання ЛГ на його вісь чутливості, ε – відносна похибка калібрування дугової ціни імпульсу, (масштабного коефіцієнту) ЛГ; $K_{NL}(\omega)$ – коефіцієнт відносної нелінійності вихідної характеристики ЛГ; B_{0g} – зміщення нуля ЛГ; $R_{\varphi i}$ – коефіцієнт випадкового дрейфу ЛГ; $\xi(t)$ – центрований стаціонарний білий шум одиничної інтенсивності; $\alpha_m [\sin(f t_n) - \sin(f t_{n-1})]$ – гармонічна складова похибки вирахування руху

вібропідставки із вихідного сигналу ЛГ; α_m – амплітуда похибки; f – кругова частота крутильних коливань моноблока); q_θ – дугова ціна імпульсу ЛГ; $\eta(t_n)$ – центрована випадкова величина, розподілена на інтервалі $[-1, \dots, +1]$ по трикутному закону за час t_n . Складові $\int_{t_{n-1}}^{t_n} R_{\phi_i} \cdot \xi(\tau) d\tau$ та $q_\theta \cdot \eta(t_n)$ характеризують похибки стохастичних процесів.

Вихідні сигнали маятникового АК описує модель:

$$V_n(\Delta t) = (1 + S_a)a_i + M_p a_p + M_h a_h + B_f + B_v a_p a_h + N_A,$$

де V_n – сигнал на виході вимірювального каналу АК; S_a – відносна похибка визначення масштабного коефіцієнта АК; M_p и M_h – коефіцієнти перехресних зв'язків осей АК; B_f – нульова похибка вимірювання; B_v – коефіцієнт похибки від впливу вібрації на маятник; N_A – випадковий шум.

Для досліджуваної БІНС запропоновано матриці переходу від установочної системи координат, зв'язаної з об'єктом до систем координат зв'язаної з БІНС. Такі матриці дозволяють визначити проекції прирощення кутів повороту та проекції прирощення удаваної швидкості об'єкта на осі системи координат зв'язаної з БІНС.

Запропоновано модель детермінованих похибок тривісного ЛГ яка включає у себе вектор зміщення нулів ЛГ, діагональну матрицю похибок масштабних коефіцієнтів тривісного ЛГ, матрицю похибок кутової орієнтації осей чутливості тривісного ЛГ. Додаткові детерміновані похибки ЛГ, що зумовлені дією температури у даній роботі не розглядались з огляду на те, що у досліджуваних зразках ЛГ використовувалась система стабілізації периметра.

Для кожного ЛГ з ТБ запропоновано модель випадкових похибок, що є сумою складових 4 видів шумових процесів:

$$n_{gj} = \varepsilon_{gj}(t) + w_{gj}^{(0)} + w_{gj}^{(r)}(t) + w_{gj}^{(q)}(t),$$

де індекс j відповідає одній з осей зв'язаних з ТБ (x, y або z); $\varepsilon_{gj}(t)$ – процеси дрейфу кутової швидкості; $w_{gj}^{(0)}$ – випадкове зміщення нуля, що виникає від запуску до запуску; $w_{gj}^{(r)}(t)$ – процес випадкового дрейфу кута; $w_{gj}^{(q)}(t)$ – похибка шуму квантування сигналу ЛГ.

Для детермінованих похибок вихідних сигналів ТБ АК статичних режимів роботи прийнято модель, що включає в себе вектор зміщення нулів ТБ АК, діагональну матрицю похибок масштабних коефіцієнтів ТБ АК, матрицю похибок кутової орієнтації осей чутливості АК. Додаткові складові детермінованих похибок ТБ АК, що обумовлені дією такого фактору як зміна температури зовнішнього середовища прийнято як функціональну залежність елементів вектора зміщення нулів ТБ АК та елементів діагональної матриці похибок масштабних коефіцієнтів ТБ АК від температури.

Для кожного АК з ТБ запропоновано модель випадкових похибок, яка враховує 3 шумові процеси:

$$n_{aj} = w_{aj}^{(0)}(t) + \varepsilon_{aj}(t) + w_{aj}^{(q)}(t),$$

де індекс j відповідає одній з осей ТБ (x , y або z); $w_{aj}^{(0)}(t)$ – випадкове зміщення нуля від запуску до запуску; $w_{aj}^{(q)}(t)$ – похибка шуму квантування сигналу АК; $\varepsilon_{aj}(t)$ – процеси дрейфу швидкості.

У другому розділі аналітично визначені основні похибки, які виникають при роботі інерціальних датчиків у статичних умовах. З урахуванням основних властивостей і принципів роботи досліджуваних у складі БІНС інерціальних датчиків визначені детерміновані похибки та процеси, що впливають на результати вимірювань. Також запропоновано моделі основних стохастичних похибок для кожного типу датчиків.

Третій розділ присвячено теоретичному розгляду сучасних методів визначення параметрів БІНС у процесі випробовувань та калібрування. Запропоновано та обґрунтовано нові методи удосконалення визначення параметрів випадкових похибок та детермінованих процесів.

Для дослідження стохастичних процесів та визначення параметрів випадкових похибок у вихідних сигналах ЛГ та АК запропоновано метод варіації Алана (ВА). Такий метод полягає у дослідженні сигналів датчиків функціональній залежності середньоквадратичного відхилення (СКВ) сигналу від величини інтервалу осереднення даних. На даний момент існує два основних підходи до оцінювання параметрів по даним ВА. У першому підході дані ВА апроксимуються по моделі ВА, що представляє собою поліном виду:

$$\sigma^2(\tau) \approx p^2(\tau) = k_{RR}^2 \frac{\tau^2}{2} + k_{RRW}^2 \frac{\tau}{3} + k_{BI}^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + k_{ARW}^2 \frac{1}{\tau} + k_{QN}^2 \frac{3}{\tau^2},$$

де σ – СКВ осереднених даних, τ – час осереднення даних, k_{RR} , k_{RRW} , k_{BI} , k_{ARW} , k_{QN} – коефіцієнти зростання дрейфу кутової швидкості (лінійного прискорення), випадкового дрейфу кутової швидкості (лінійного прискорення), нестабільності зміщення нуля, випадкового дрейфу кута (швидкості), шуму квантування відповідно. Недоліком такого методу є те, що для коректного визначення параметрів треба заздалегідь знати наявність або відсутність різних видів шумових процесів, що характеризуються переліченими коефіцієнтами. У другому підході визначення параметрів ВА виконується графічним способом, що виключає на даний момент автоматизацію пошуку параметрів програмними методами, але дає змогу достовірно оцінювати параметри наявних стохастичних процесів.

Для класу ЛГ, що досліджувались у роботі (RL-28) характерна відсутність дрейфів кутової швидкості у даних ВА. Тому основними параметрами, що визначались по ВА для ЛГ залишались випадковий дрейф кута, шум квантування та нестабільність зміщення нуля. Однією з найсуттєвіших проблем оцінювання параметрів ВА для ЛГ навігаційного класу точності у даному випадку являється значний вплив шуму квантування на спотворення даних ВА відносно випадкового дрейфу кута. На рис.1 приведено графік з результатами моделювання впливу шуму квантування на інші параметри ВА. При цьому похибка визначення параметрів підходом апроксимації даних по моделі значно зростає при збільшенні шуму

квантування (від 0,1 до 5,0 кут.сек). Ряд моделювань дав змогу визначити, що ціна похибки являється критичною при значенні шуму квантування 5,0 кут.сек. і не дає змоги використовувати цей підхід при випадковому дрейфі кута ЛГ на рівні 0,002 град/√год.

Для графічного підходу оцінювання даних було запропоновано використати фільтрацію даних методом вейвлет-перетворення сигналу з метою відокремлення білого шуму. Використання такого методу на експериментальних даних дало змогу графічно відобразити ті характеристики ВА, що були спотворені даними шуму квантування. Для підтвердження ефективності даних було виконано аналіз ВА для синтезованих шумових процесів з параметрами приблизно рівними параметрам досліджуваних ЛГ. Перевірка ефективності удосконаленого методу статичних випробувань виконувалась на основі аналізу визначення основної характеристики стохастичних процесів ЛГ навігаційного класу точності – випадкового дрейфу кута. Для моделювання сигналу ЛГ було обрано наступні параметри:

$$k_{QN} = 1,5 \text{ кут.сек}, k_{ARW} = 0,007 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{год}},$$

$$k_{BI} = 0,015 \text{ }^\circ/\text{год}, k_{RR} = 0, k_{RRW} = 0.$$

Результати застосування традиційного та вдосконаленого методів оцінки параметрів стохастичних процесів методом ВА для досліджуваного типу ЛГ у складі БНС наведено у рис.1 та рис.2 відповідно.

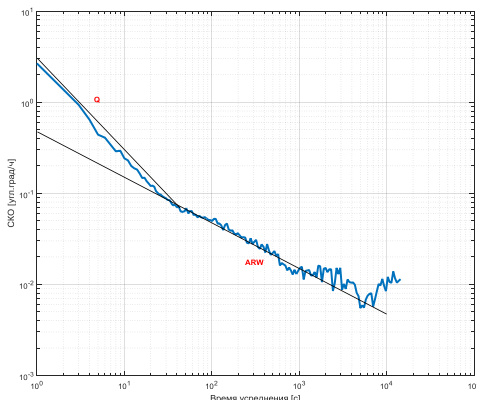


Рис. 1. ВА синтезованого сигналу ЛГ

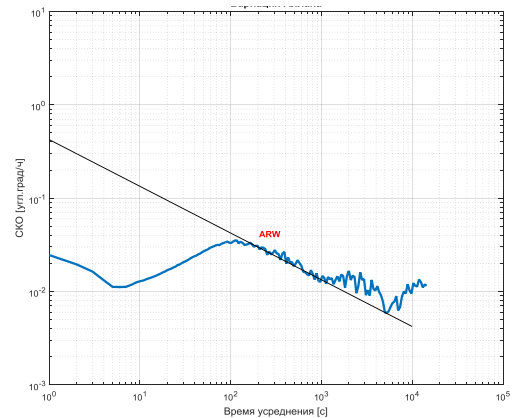


Рис. 2. ВА синтезованого сигналу ЛГ після застосування вейвлет-перетворення

$$k_{ARW_1} = 0,0083 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{год}}$$

$$k_{ARW_2} = 0,0067 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{год}}$$

Отримані результати теоретичних досліджень доводять, що застосування методів вейвлет-перетворення для попередньої обробки сигналів ЛГ дало змогу підвищити точність визначення параметрів стохастичних випробувань ЛГ.

Для дослідження шумових характеристик АК навігаційного класу точності також використовується метод ВА. Однак його стохастичні процеси на відміну від стохастичних процесів ЛГ мають наступні визначення: шум квантування, випадковий дрейф швидкості, нестабільність зміщення нуля, випадковий дрейф прискорення та зростання дрейфу прискорення. Останні два процеси для маятникових АК, конструкція яких не передбачає термостатуючого об'єму, мають

дуже значний вплив на спотворення характеристик всіх інших шумових процесів по даним ВА. На рис.3 представлено графіки кривих ВА у осях з логарифмічним масштабом при різних значеннях коефіцієнтів дрейфу прискорення. При моделюванні кривих 1-10 на рис.3 були вибрані наступні параметри ВА:

$$k_{QN}=0,05 \text{ м/с}^2\cdot\text{с}, k_{ARW} = 0,002 (\text{м/с}^2)/\sqrt{\text{с}},$$

$$k_{BI} = 0,00005 \text{ м/с}^2, k_{RR} = 0 \dots 0,001 \text{ м/с}^2/\text{с}, k_{RRW} = 0.$$

Представлені дані моделювання ВА для досліджуваного типу АК наглядно демонструють вплив наявності дрейфів прискорення на визначення нестабільності зміщення нуля. Висока частка даних, що характеризують дрейф прискорення АК зумовлена тим, що на вихідні сигнали

досліджуваних датчиків впливає зміна температури робочого середовища. Робочим середовищем для них у даному випадку являється об'єм БІНС. Таким чином, теплові процеси, що виникають унаслідок роботи електронних блоків БІНС мають вплив на маятникові АК без системи термостатування їх робочого середовища. При виробництві таких систем підприємством, випробування всієї системи одночасно дає змогу скоротити час на випробування кожного з цих датчиків окремо. У даній роботі запропоновано вдосконалення методу статичних випробувань АК.

Встановлення температурної рівноваги усередині вимірювальних приладів під час їх роботи, що називається саморозігрівом, запропоновано представляти як аперіодичний перехідний процес, що описується рівнянням:

$$F(t) = p_1 e^{p_2 t} + p_3 e^{p_4 t} + p_5,$$

де $F(t)$ – вихідний інформаційний сигнал АК у складі БІНС; $p_1 \dots p_5$ – параметри рівняння перехідного процесу.

Виходячи з умов проведення статичних випробувань (нормальна температура навколишнього середовища, відсутність механічних факторів) складова $w_{aj}^{(0)}(t)$ з моделі випадкових похибок АК буде номінально відповідати похибці постійного зміщення нуля АК, яка виникає внаслідок зміни температури у процесі саморозігріву БІНС:

$$w_{aj}^{(0)}(t) = F(t).$$

Як було наведено вище, наявність детермінованої температурної похибки у вихідному сигналі АК призводить до ускладнень у визначенні параметрів його шумових процесів методом ВА і у даному випадку запропоновано виконати попередню обробку первинних вихідних сигналів АК. Суть такої обробки у даному методі полягає у відніманні центрованої щодо свого початкового значення t_0 функції $w_{aj}^{(0)}(t)$ з вихідного сигналу АК:

$$a_j^-(t) = a_j(t) - w_{aj}^{(0)}(t) - w_{aj}^{(0)}(t_0),$$

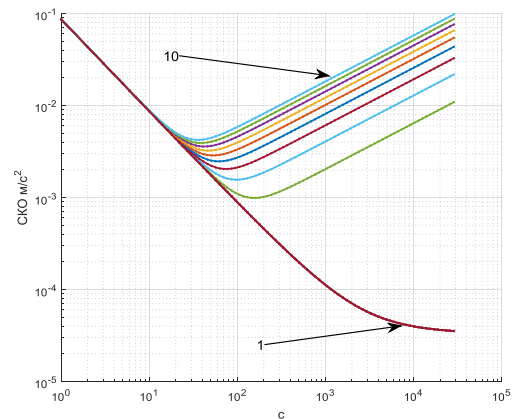


Рис. 3. Результат моделювання кривих ВА для різних параметрів дрейфу швидкості сигналів акселерометра

де $a_j^-(t)$ – сигнал АК з урахуванням корекції температурної похибки.

Наступним етапом дослідження стохастичних характеристик АК є обчислення ВА для сигналу $a_j^-(t)$. Різниця між ВА сигналу АК до обробки і після вирахування температурної похибки представлена на рис. 4 та рис. 5.

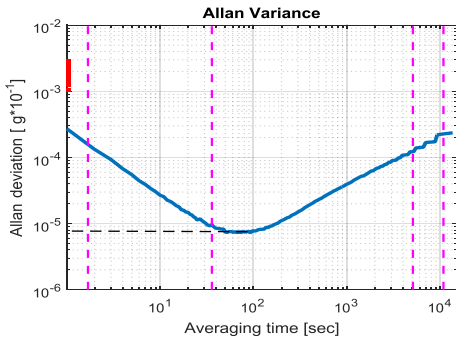


Рис. 4. Варіація Алана сигналу АК до врахування температурної похибки

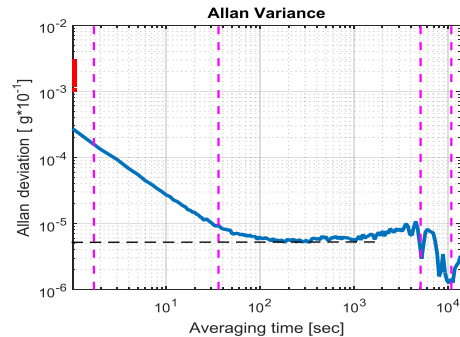


Рис. 5. Варіація Алана сигналу АК після врахування та усунення температурної похибки

Як видно з графіку, представленого на рис.4 до обробки сигналу АК коефіцієнт нестабільності зсуву нуля становив $1,2 \cdot 10^{-6}$ g, дана характеристика була спотворена наявністю температурного дрейфу, що у свою чергу призвело до некоректної оцінки потенційних характеристик датчика. Після застосування корекції сигналу АК, для вирахування похибки внаслідок температури саморозігріву (рис.5), коефіцієнт нестабільності зсуву нуля, який був визначений методом ВА склав $7,5 \cdot 10^{-7}$ g.

Результати теоретичного дослідження запропонованого методу довели, що він є ефективним засобом статичних випробувань АК та дозволяє отримувати з більшою точністю параметри характеристик на основі їх вихідних сигналів, що були спотворені внаслідок впливу температури саморозігріву БІНС на результати випробувань. Такий метод також підвищує ефективність випробувань з точки зору затрат часу на устаткування, так як у даному випадку немає вимог до стабілізації температури оточуючого середовища інерціального датчика.

Метод температурних випробувань у даній роботі розроблено з метою удосконалення процесу встановлення залежності основних параметрів інерціальних датчиків, які визначають точнісні характеристики БІНС від зміни температури навколишнього середовища. Такими параметрами є масштабні коефіцієнти та детерміновані зміщення нулів інерціальних датчиків.

Головним недоліком маятникових АК у досліджуваному БІНС є висока температурна залежність роботи їх чутливих елементів, що призводить до збільшення похибки визначення положення об'єкта в інерціальній системі координат за рахунок дрейфів вихідних сигналів вимірювальних каналів АК (рис.6).

Дослідження похибок вимірювань від впливу температури проводилися з тривісним АК, особливістю конструкції якого є відсутність термостатуючого об'єму.

Функціональна схема вимірювальних каналів такого тривісного АК представлена на рис.7.

Температурний дрейф тривісного АК проявляється у тому, що при незалежному від температури значенні вхідного струму $I_{x(y,z)}$ на виході БПС спостерігається істотна з точки зору точності перетворення похибка значень вихідних кодів $N_{x(y,z)}$, що обумовлена впливом зміни температури навколишнього середовища. На підставі спостереження факту відтворюваності температурного дрейфу в серії повторних випробувань запропоновано вважати, що існує функція $f_{x(y,z)}^T(\Delta T)$, яка з достатньою точністю апроксимує залежність вихідної інформації від зміни температури ΔT . Так як у складі тривісного АК передбачена наявність датчика температури у БПС, то апроксимуюча функція $f_{x(y,z)}^T(\Delta T)$ трансформується в іншу – $F_{x(y,z)}^T(N_t)$, де N_t – вихідний код термодатчика. Така функція встановлює взаємно однозначну відповідність між показами термодатчика та значенням вихідного коду вимірювальних каналів. З урахуванням того, що БПС призначений для перетворення значень вхідного струму у цифрову форму, функція повинна бути від двох незалежних змінних:

$$N_{x(y,z)}(A_{x(y,z)}, N_t) = F_{x(y,z)}^T(A_{x(y,z)}, N_t)$$

де $A_{x(y,z)}$ – вихідний сигнал вимірювальних каналів тривісного АК.

Враховуючи математичну модель похибок вихідних сигналів тривісного АК та обраних параметрів для температурної компенсації функцію залежності формування сигналу від кодів термодатчика можна представити у вигляді суми двох функцій:

$$F_{x(y,z)}^T(A_{x(y,z)}, N_t) = F_{cx(y,z)}(A_{x(y,z)}, N_t) + \Delta F_{sx(y,z)}(A_{x(y,z)}, N_t),$$

де $F_{cx(y,z)}^T(N_t)$ – апроксимуюча функція, що описує відносну зміну центрованого значення цифрового коду від температури, що характеризує детерміноване зміщення нуля на виході вимірювальних каналів тривісного АК, $\Delta F_{sx(y,z)}(A_{x(y,z)}, N_t)$ – апроксимуюча функція, що нормована по відношенню детермінованого зміщення

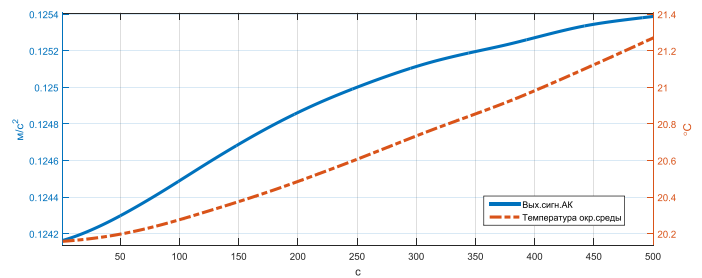


Рис. 6. Дрейф сигналу маятникового акселерометра, при зміні температури оточуючого середовища на 1 °C

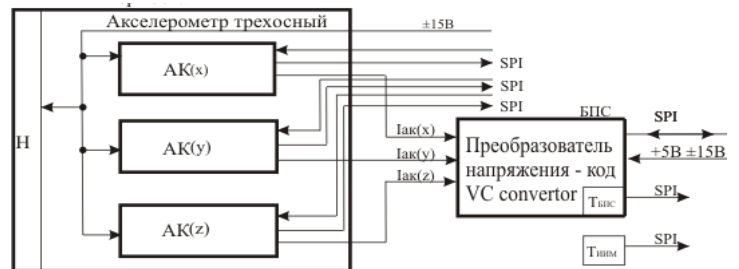


Рис. 7. Функціональна схема досліджуваного тривісного акселерометра:

АКх (у,z) – акселерометри; БПС – блок перетворення сигналів; Н – нагрівач; SPI – інтерфейс інформаційного обміну; $T_{БПС}$ – термодатчик на платі БПС; $T_{иим}$ – термодатчик для вимірювання температури зовнішнього середовища, розміщений на корпусі БПС.

нуля та характеризує залежність масштабного коефіцієнту на виході вимірювального каналу АК.

Кінцевою метою, запропонованого методу температурних випробувань є також компенсація температурних похибок у вихідних кодах $N_{x(y,z)}$ вимірювальних каналів тривісного АК. Для цього була розроблена коригуюча ланка температурного впливу на вихідні сигнали тривісного АК (рис.8).

В роботі також запропонована циклограма для методики набору даних для температурних випробувань та алгоритмічний підхід до застосування коригуючої ланки при компенсації похибок у зміні температури у динамічному та статичному режимі.

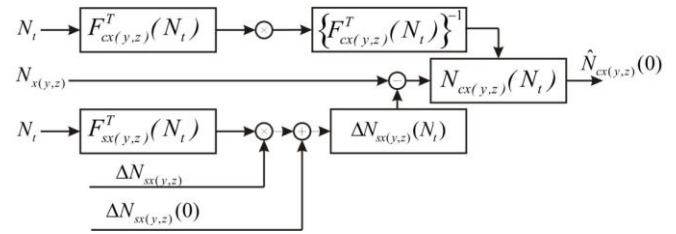


Рис. 8. Загальна схема коригуючої

ланки температурного впливу на АК
роботі розроблено метод стендового калібрування. Особливістю розробленого стендового методу калібрування та корекції вихідних сигналів АК та ЛГ у складі БІНС є застосування моделі сигналів, що формуються у статичних умовах для кожної кутової орієнтації БІНС без застосування операцій нормування та блочний підхід формування систем рівнянь для визначення детермінованих похибок основних параметрів. Систему рівнянь інформаційних сигналів тривісного АК запропоновано представляти у векторно-матричному вигляді:

$$\mathbf{A} = \mathbf{b} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{a} + \mathbf{n},$$

$$\text{де } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}; \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix}; \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}; \mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}; \mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix};$$

ліва частина рівняння представляє собою вихідні сигнали вимірювальних каналів ТБ АК, a_x, a_y, a_z – проекції вектора прискорення сили тяжіння на осі ортогональної системи координат, що номінально збігаються з осями чутливості АК або ЛГ, b_x, b_y, b_z – детерміновані зміщення нулів, елементи матриці $\mathbf{K}$ 3×3 представляють собою масштабні коефіцієнти зв'язані з коефіцієнтами перехресних зв'язків внаслідок неортогональностей осей чутливості АК або ЛГ, n_x, n_y, n_z – випадковий шум.

На етапі виконання методів випробувань для визначення стохастичних характеристик досліджуваних зразків АК та ЛГ, що входять у ТБ по даним варіації Алана визначено оптимальний час накопичення даних для одного випробування під час калібрування, що дорівнює приблизно 100 с. При осередненні (розрахунку математичного очікування) сигналів за обраний час накопичення даних похибка випадкових шумів досліджуваних ТБ АК і ЛГ компенсується і дорівнює нулю. Таким чином осереднені за визначений проміжок часу вихідні сигнали вимірювальних каналів ТБ АК, отримані для однієї з просторових орієнтацій БІНС

під час калібрування (рис.9), вважаються вимірним значенням проекцій скалярної величини.

При умові проведення $i \geq 4$ випробувань для різних просторових орієнтацій БІНС для кожного інформаційного каналу тривісного АК та ЛГ розглядається система з i рівнянь та розв'язується окремо за допомогою методу найменших квадратів (МНК). Однак при кількості рівнянь, що близька до мінімальної виникає загальновідома проблема вироджених матриць у розв'язках МНК. Так проблема пов'язана з зміною кутової орієнтації тривісного поворотного стенду для калібрування на однакові кути по його осям. Для усунення даної проблеми при формуванні елементів вектора проекцій скалярної величини на осі координат, що зв'язані з БІНС запропоновано використовувати алгебру кватерніонів.

Блочний підхід у розв'язку систем з i -ї кількості випробувань БІНС на тривісному поворотному стенді для кожного вимірювального каналу тривісних блоків ЛГ і АК дає змогу визначити шукані значення детермінованого зміщення нулів та зв'язаних значень масштабних коефіцієнтів й перехресних зв'язків з іншими вимірювальними каналами.

Користуючись визначенням таким чином зміщення нулів та елементами матриці **K** для інформаційних каналів ТБ ЛГ та АК було створено алгоритм корекції для застосування в апаратурі обробки сигналів БІНС, який виконує оцінку проекцій еталонних скалярних величин на осі ортогональної системи координат, що зв'язана з осями чутливості ТБ ЛГ та АК.

Відмінність розроблених методик стендового калібрування ТБ ЛГ від методики калібрування ТБ АК полягає у використанні оптичної призми з атестованим значенням азимутального кута для визначення проекції скалярної величини – кутової швидкості обертання Землі.

У четвертому розділ на основі вдосконалених методів ВА для дослідження стохастичних характеристик інерціальних датчиків були розроблені методики статичних випробувань ЛГ RL-28 та АК АКС-05 у складі інерціально-вимірювальних блоків для побудови БІНС навігаційного класу точності для наземного застосування.

Відпрацювання методик статичних випробувань проводилось на розв'язаному фундаменті в умовах лабораторії (рис.10).

В результаті виконання методик статичних випробувань були накопичені масиви даних для 4 запусків ТБ ЛГ і АК у складі БІНС, тривалістю по 6 годин.

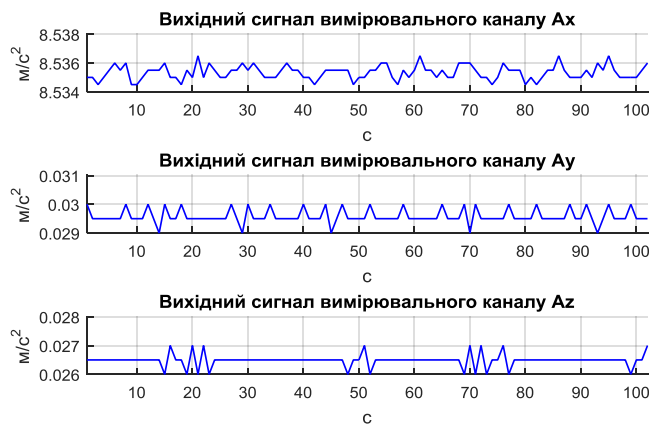


Рис. 6. Експериментальні сигнали ТБ АК отримані під час випробування для калібрування.

Графіки ВА для кожного запуску, згідно з удосконаленим методом ВА для ЛГ були побудовані для сигналів з відокремленою складовою шумів квантування і для шумів квантування. Це значно спростило визначення графічним способом не тільки параметрів шуму квантування (Q_A) і випадкового дрейфу накопиченого кута (ARW) але і дало можливість точно визначати час осереднення даних для мінімізації похибок від шуму квантування і випадкового дрейфу накопиченого кута. За даним значенням часу усереднення у подальшому визначався час накопичення даних БІНС для методики стендового калібрування. По результатам ВА, графічним методом було визначено параметри стохастичних процесів ТБ ЛГ (табл.1).



Рис. 10. Статичні випробування БІНС на розв'язаному фундаменті

Таблиця 1. Результати оцінки стохастичних характеристик ТБ ЛГ

	Запуск 1	Запуск 2	Запуск 3	Запуск 4	Сер. знач.
Q_X [кут.с]	0.40	0.35	0.40	0.40	0.39
Q_Y [кут.с]	0.25	0.25	0.30	0.25	0.26
Q_Z [кут.с]	0.20	0.25	0.25	0.20	0.22
ARW_X [$^{\circ}/\sqrt{ч}$]	0.0015	0.0010	0.0017	0.0015	0.0014
ARW_Y [$^{\circ}/\sqrt{ч}$]	0.0012	0.0010	0.0011	0.0012	0.0011
ARW_Z [$^{\circ}/\sqrt{ч}$]	0.0004	0.0006	0.0007	0.0007	0.0006
BI_X [$^{\circ}/год$]	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016
BI_Y [$^{\circ}/год$]	0.0018	0.0018	0.0016	0.0018	0.0017
BI_Z [$^{\circ}/год$]	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015

Результати ВА для сигналів ТБ АК, що були отримані за допомогою обробки експериментальних даних по вдосконаленому методу ВА дозволили визначити не тільки його стохастичні характеристики, але і встановити наявність залежності його вихідного сигналу від температури саморозігріву, та коефіцієнти такої залежності, які у подальшому використовуються у моделюванні. На рис.11 наведено графік ВА для ТБ АК у складі БІНС. На відміну від ЛГ на графіках ВА всіх АК з ТБ спостерігається наявність ділянок кривої ВА з позитивним асимптотичним нахилом. Однак при детальному розгляді нахил цих ділянок знаходився між величиною $+1/2$ і $+1$ дБ, що характерно для даних з експоненціальним характером зростання. Це у свою чергу підтвердило те, що вихідний сигнал досліджуваних АК залежить від температури саморозігріву БІНС при роботі у нормальних умовах.

Подальший аналіз отриманих даних методом ВА дозволив усунути вплив процесу саморозігріву БІНС на вихідні сигнали АК, що дало можливість більш точно оцінити коефіцієнт стохастичної нестабільності зсуву нуля. На рис.12 представлено ВА після видалення даної характеристики з сигналів АК.

У досліджуваних зразках АК спостерігалась відсутність похибки блукання швидкості (VRW), що характерно для АК навігаційного класу точності. Основними джерелами інформації щодо стохастичних характеристиках АК у даному випадку були параметри шумів квантування (QN) і стохастична нестабільність зміщення нуля (BI).

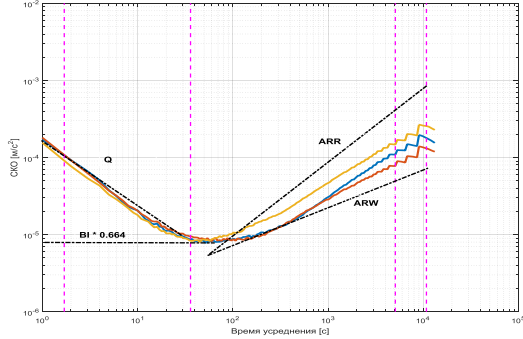


Рис. 11. ВА сигналу ТБ АК до корекції температурної похибки саморозігріву

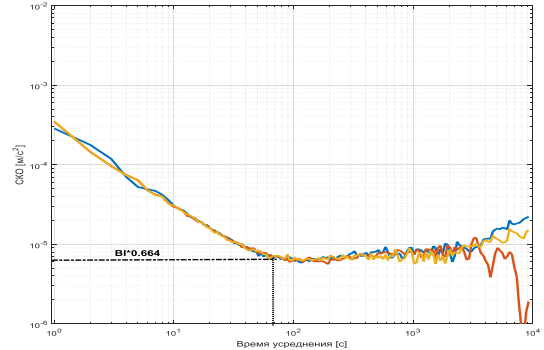


Рис. 12. ВА сигналу ТБ АК після корекції температурної похибки саморозігріву

Результати обробки удосконаленим методом даних, отриманих під час статичних випробувань, підтвердили точнісні характеристики ТБ АК та придатність до подальших випробувань (табл.2).

Таблиця 2. Результати оцінки стохастичних характеристик ТБ АК

	Запуск 1	Запуск 2	Запуск 3	Запуск 4	Сер. знач.
$Q_x [\mu g \cdot c]$	11	11	11	11	11
$Q_y [\mu g \cdot c]$	10	11	10	10	10
$Q_z [\mu g \cdot c]$	10	11	11	11	11
$BI_x [\mu g]$	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
$BI_y [\mu g]$	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
$BI_z [\mu g]$	0.75	0.80	0.75	0.80	0.77

Експериментальне відпрацювання розробленого методу температурних випробувань досліджуваного БІНС було розділене на два основних етапи. До першого відносилось визначення параметрів температурної характеристики ТБ АК і побудова алгоритму корекції на основі отриманих параметрів. До другого – перевірка нестабільності вихідних сигналів ТБ ЛГ в умовах температурних випробувань. При нормальній роботі системи стабілізації периметра ЛГ, похибки, пов'язані з нестабільністю сигналу в умовах зміни температур у робочому діапазоні, не повинні перевищувати максимально допустимі значення похибок, які вказані у паспорті виробу. Особливістю температурних випробувань БІНС є те, що температура всередині її корпусу відрізняється від температури встановленої всередині термокамери за рахунок саморозігріву приладу. З огляду на даний ефект при обробці експериментальних даних, для отримання параметрів апроксимуючих функцій не використовувались дані роботи термокамери. Для отримання коректних результатів використовувались дані термодатчиків, які були встановлені всередині корпусу БІНС і до початку температурних випробувань були попередньо відкалібровані.

На основі розробленого методу алгоритмічної температурної компенсації було розроблено методику проведення випробувань з використанням термокамери і механічного тривісного поворотного станду встановленого в ній (рис.13). Був виконаний цикл запусків у якому кожна вісь ТБ АК встановлювалась вертикально і випробувалась у діапазоні температур від -40 до +65 °С.



Рис. 13. БІНС в термокамері на механічному поворотному станді під час охолодження

У результаті проведених випробувань та обробки даних було отримано стійку кореляцію похибок зміщення нуля та масштабних коефіцієнтів АК від впливу динамічного та статичного режимів зміни температури. У подальшому для цих залежностей шляхом апроксимацій були розраховані коефіцієнти, що застосовувались у розробленому для даного методу алгоритмі корекції. Результати корекції вихідних сигналів ТБ АК від температурних похибок в усіх експериментах задовольняли допустимому значенню на нестабільність зміщення нуля $5 \cdot 10^{-4}$ м/с² (табл.3).

Таблиця 3. Оцінки похибки температурної корекції вихідних сигналів ТБ АК

СКВ (3σ) сигналу АКх, м/с ²		СКВ (3σ) сигналу АКх, м/с ²		СКВ (3σ) сигналу АКу, м/с ²	
до корекції	після корекції	до корекції	після корекції	до корекції	після корекції
Температурний режим (-20°C)		Температурный режим (-20°C)		Температурный режим (-20°C)	
0.0975	0.00012	0.0968	0.00015	0.0715	0.00013
Температурний режим (+60°C)		Температурный режим (+60°C)		Температурный режим (+60°C)	
0.1241	0.00046	0.1830	0.00038	0.1212	0.00042

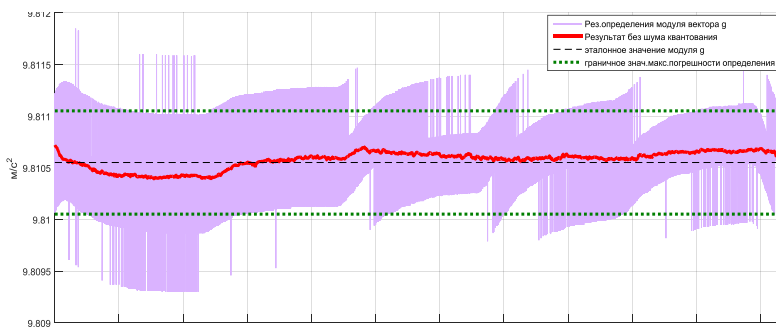


Рис. 14. Результат вимірювання вектора g ТБ АК з використанням алгоритмічної температурної корекції

На рис. 14 представлено результат вимірювання ТБ АК вектора g під час випробувань діапазоні температур -20...+60°C з застосуванням у режимі реального часу алгоритмічної корекції температурних похибок. Зменшення температурної похибки до меж допустимих відхилень при використанні на практиці отриманих параметрів розробленої моделі корекції вихідних сигналів

ТБ АК довело ефективність та практичну цінність розробленого методу температурних випробувань.

П'ятий розділ присвячено практичній реалізації розроблених методів стендового калібрування ТБ АК та ЛГ у складі БІНС.

Стендове калібрування у даній роботі є заключною частиною прийомочних випробувань БІНС, і тому успішне завершення таких випробувань дає обґрунтування точностних характеристик первинних вимірювань інерціальних датчиків БІНС для вирішення навігаційних задач. Для коректної процедури калібрування блоків інерціальних датчиків у складі БІНС необхідна забезпечуватись температурна стабільність їх вихідних сигналів. Як правило це досягається стабілізацією температури зовнішнього середовища, що у свою чергу передбачає наявність дорогого устаткування (наприклад двовісного поворотного стану з термокамерою). Однак послідовність випробувань у даній роботі обрана таким чином, що температурна залежність похибок вихідних сигналів БІНС усувається шляхом алгоритмічної температурної компенсації. Отже калібрування може бути проведене у діапазоні робочих температур приладу і це значно спрощує вимоги до лабораторного оснащення. Завдяки аналізу стохастичних параметрів виконаних на етапі статичних випробувань для інерціальних датчиків метод стендового калібрування дозволяє також оцінювати детерміновані похибки БІНС за максимально короткий час без втрати точності від впливу шумів квантування. Перевагою методу стендового калібрування БІНС щодо інших, традиційних методів, таких як скалярне калібрування є розробка та застосування моделі вихідних сигналів, яка не вимагає високих обчислювальних навантажень для розв'язання оберненої до пошуку калібрувальних параметрів задачі – корекції вихідних сигналів за допомогою отриманих шляхом лабораторних досліджень параметрів.

На підставі порівняння вимірних значень прискорення вільного падіння і кутової швидкості Землі з їх еталонними значеннями вдалося виконати оцінку точності калібрування ТБ ЛГ і АК за двома параметрами: нестабільність визначення еталонної величини у різних просторових орієнтаціях БІНС і відхилення математичного очікування оцінок еталонної величини у різних просторових орієнтаціях. Остання оцінка для ТБ ЛГ і АК була близькою до нуля, що є підтвердженням правильності обраного алгоритму калібрування (рис.14). Нестабільність відхилення оцінок еталонних величин у просторових орієнтаціях відноситься до похибки нестабільності зсуву нуля під час запуску. Після калібрувань максимальні значення цієї похибки були наступні (табл. 4 і табл. 5):

- для АК: $2,89 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$ (допустиме значення $5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$);

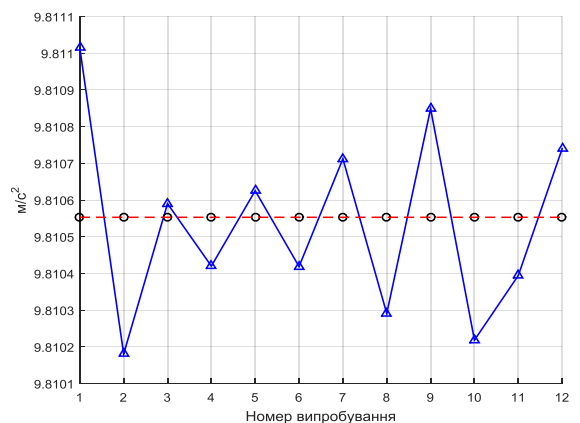


Рис. 14. Результати визначення вектора g щодо його еталонного значення

—▲— оцінка g після корекції вихідного сигналу, ○ — еталонне значення g , --- — середнє значення оцінок g .

- для ЛГ: $1 \cdot 10^{-3}$ °/год (допустиме значення $1,5 \cdot 10^{-2}$ °/год).

Проведення трьох циклів калібрувань так само дало можливість встановити похибку таких стохастичних параметрів БІНС як нестабільності зсуву нуля від запуску до запуску і нестабільності масштабного коефіцієнта. Для ТБ ЛГ максимальні значення цих параметрів мали такі значення:

- нестабільність зміщення нуля від запуску до запуску: 0.003 °/год (допустиме значення 0,015 °/год);

- нестабільність масштабного коефіцієнта від запуску до запуску: 1,8 ppm (допустиме значення 10 ppm).

Для ТБ АК нестабільності зміщення нулів та масштабних коефіцієнтів після проведення серії калібрувань були встановлені з наступними значеннями:

- нестабільність зміщення нуля ТБ АК від запуску до запуску: $4,7 \cdot 10^{-5}$ м/с² (допустиме значення $5 \cdot 10^{-4}$ м/с²);

- нестабільність масштабного коефіцієнта від запуску до запуску: 146 ppm (допустиме значення 200 ppm).

Таблиця 4. Оцінка похибок калібрування ТБ ЛГ

№ калібрування	Різниця середньої оцінки вектора ω та еталону $ M\{\hat{\omega}_n\} - \omega $ (°/год)	Нестабільність визначення вектора ω до корекції $\delta_{\hat{\omega}}$ (°/год)	Нестабільність визначення вектора ω після корекції $\delta_{\hat{\omega}}$ (°/год)
1	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$3,61 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-3}$
2	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$2,32 \cdot 10^{-2}$	$0,53 \cdot 10^{-3}$
3	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$0,41 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 5. Оцінка похибок калібрування ТБ АК

№ калібрування	Різниця середньої оцінки вектора g та еталону $ M\{\hat{g}_n\} - g $ (м/с ²)	Нестабільність визначення вектора g до корекції $\delta_{\hat{g}}$ (м/с ²)	Нестабільність визначення вектора g після корекції $\delta_{\hat{g}}$ (м/с ²)
1	$3,21 \cdot 10^{-9}$	0.21	$2,26 \cdot 10^{-4}$
2	$2,90 \cdot 10^{-9}$	0.07	$2,89 \cdot 10^{-4}$
3	$1,91 \cdot 10^{-8}$	0.12	$2,04 \cdot 10^{-4}$

Результати, отримані у процесі виконання калібрувань досліджуваної БІНС дозволяють зробити висновок про правильність обраних рівнянь для моделювання вихідних сигналів ТБ АК і ЛГ та практичній цінності розроблених методів стендового калібрування.

У додатках наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи та лістинги програм для обробки експериментальних даних БІНС.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача удосконалення і розробки методів випробувань і калібрування для БІНС високого

класу точності, що застосовується для вирішення завдань початкової виставки наземних рухомих об'єктів.

1. У роботі наведено огляд основних положень методів випробовувань та калібрування, виконана їх класифікація. Виконано наукове обґрунтування необхідних для визначення шляхом випробувань параметрів випадкових процесів інерціальних датчиків. Обґрунтовано вибір випробувань для визначення детермінованих похибок досліджуваного типу БІНС. У результаті детального огляду і аналізу існуючих методів випробовувань та калібрування БІНС, а також на основі досвіду практичної роботи з інерціальними датчиками була розроблена послідовність випробовувань та калібрування для досліджуваного типу БІНС. Перелік і послідовність методів випробовувань та калібрування розроблялися виходячи з практичних міркувань в економії часу і витрат на випробувальне обладнання. При такому підході до методів випробувань, основна увага була спрямована на використання сучасних математичних методів обробки експериментальних даних, що дозволяють оцінювати параметри інерціальних датчиків з максимальною точністю. Такими методами у даній роботі є метод варіації Алана, метод вейвлет аналізу сигналів, методи застосування алгебри кватерніонів і нелінійної оптимізації для апроксимації детермінованих процесів викликаних зовнішніми факторами.

2. Виконано огляд точностних параметрів сучасних інерціальних датчиків навігаційного класу точності. Результати огляду інерціальних датчиків використовувалися у роботі для визначення допустимих значень параметрів точності та моделювання вихідних сигналів БІНС для дослідження ефективності розроблених методів.

3. Удосконалено і теоретично обґрунтовано метод визначення параметрів стохастичних похибок ЛГ шляхом застосування вейвлет аналізу при використанні варіації Алана. На підставі поєднання цих двох методик був розроблений метод статичних випробувань для тривісного ЛГ. Отримані параметри у результаті застосування такого методу використовувалися у подальшому для розробки методики стендового калібрування. Результати визначення характеристик синтезованих шумів підтвердили ефективність застосування методу варіації Алана для достовірного визначення стохастичних характеристик ЛГ.

4. Удосконалено і теоретично обґрунтовано метод визначення нестабільності зсуву нуля АК під час запуску шляхом застосування апроксимації для визначення і корекції детермінованих похибок внаслідок саморозігріву БІНС. Наведено теоретичний опис методу оптимізації для пошуку параметрів нелінійної регресійної моделі яка описує детерміновану похибку АК, викликану нагріванням середовища всередині корпусу БІНС. Результати визначення характеристик експериментальних даних ТБ АК в умовах статички і саморозігріву БІНС підтвердили ефективність застосування удосконаленого методу для статичних випробувань і достовірного визначення нестабільності зсуву нулів АК під час запуску.

5. Новизна і ефективність розроблених методів стендового калібрування ТБ АК і ЛГ полягає у використанні алгебри кватерніонів і блочного підходу для

розв'язку рівнянь калібрування, а також використання апостеріорних даних статичних випробувань, що в сукупності дозволило значно знизити кількість і тривалість лабораторних випробувань БІНС відносно традиційних методів скалярного калібрування. Також у даній методиці використовувався підхід, який дозволив підвищити надійність та невимогливість алгоритму корекції на основі проведеного калібрування за рахунок спрощеної математичної моделі похибок вихідних сигналів ТБ інерціальних датчиків. Такий підхід полягає у зв'язуванні параметрів масштабних коефіцієнтів та перехресних зв'язків осей для подальшого їх використання у моделі корекції. При цьому зникає потреба роздільного визначення кутів неортогональності осей.

6. Результати досліджень впроваджені на кафедрі приладів і систем орієнтації і навігації приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та на підприємстві КП СПБ «Арсенал» і використовуються у методиках випробувань дослідних зразків інерціальних навігаційних вимірювачів на базі ЛГ і маятникових АК навігаційного класу точності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Головач С.В. Экспериментальные исследования характеристик лазерного гироскопа / С.В. Головач // Вісник НТУУ «КПІ», Серія приладобудування. – 2014. – Вип. №47(1). – С.33-38 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших).

2. Аврутов В.В. Скалярный метод контроля и диагностики инерциально-измерительного модуля / В.В. Аврутов, С.В. Головач // Вісник НТУУ «КПІ», Серія приладобудування. – 2014. Вип. №48(2) – С.14-20 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших).

Здобувачем виконано аналітичний розрахунок допустимих відхилень контрольованих параметрів для використання в алгоритмі скалярної діагностики інерціального вимірювального модуля.

3. Головач С.В. Комплексная алгоритмическая компенсация температурного дрейфа и-змерительного канала трехосного акселерометра в составе БИНС / С.В. Головач // Вісник НТУУ «КПІ», Серія приладобудування. – 2015. – Вип. № 50(2). – С.27-34 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших).

4. Аврутов В.В. Метод калібрування та корекції вихідних сигналів тривісного акселерометра / В.В. Аврутов, С.В. Головач, О.М. Сапегін, М.Ю. Хутко // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський Політехнічний Інститут". – 2016. – Вип. 2016/1. – С. 92-98 (Входить до WorldCat, Google Scholar, OpenAIRE, РИНЦ та EBSCO та інших).

Здобувачем розроблено алгоритм корекції вихідного сигналу акселерометра, виконано експериментальні дослідження по застосуванню розробленого методу калібрування для тривісних акселерометрів в лабораторних умовах.

5. Головач С.В. Результаты применения метода алгоритмической компенсации температурных дрейфов измерительных каналов трехосного акселерометра / С.В. Головач // Вісник НТУУ «КПІ», Серія приладобудування. – 2016. – Вип. №51(1). – С.12-18 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших).

6. Аврутов В.В. О скалярной калибровке инерциального измерительного модуля / В.В. Аврутов, С.В. Головач, Т.Ю. Мазепа // Материалы XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. Сборник докладов. – СПб, 2012. – С.113-118.

Здобувачем обґрунтовано метод скалярного калібрування, розроблено математичну модель вихідних сигналів інерціально-вимірювального модуля, розроблено алгоритм калібрування тривісних блоків акселерометрів і гіроскопів.

7. Аврутов В.В. Скалярная диагностика инерциально-измерительного модуля / В.В. Аврутов, С.В. Головач, С.О. Гуриненко // Материалы VII научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых с международным участием. – Ковров, 2015. – С. 200-208.

Здобувачем запропоновано блочний підхід розв'язку рівнянь скалярного калібрування.

8. Головач С.В. Результаты экспериментальных исследований блока лазерных гироскопов / С.В. Головач // Тез. допов. на Міжнародній наук.-техн. конф. «Приладобудування. Стан і перспективи 2012». – 2012. – С.46-47.

9. Аврутов В.В. Особенности скалярного метода калибровка инерциально-измерительного модуля БИНС / В.В.Аврутов, С.В. Головач // XIV Міжнародна молодіжна наук.-техн. конференція «Людина і Космос»: тез. допов. – Дніпропетровськ, 2012.

Здобувачем виконана аналітична оцінка похибки скалярною калібрування.

10. Головач С.В. Общая характеристика и результаты применения метода вариации Аллана для оценки стохастических процессов лазерных гироскопов / С.В. Головач // Современные технологии в системах управления и вооружения: сборник статей международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию высшего образования в г. Коврове. – Ковров, 2013. – С.116-117.

11. Вахлаков А.Ю. Результаты оценки статистических точностных характеристик лазерных гироскопов по статистике Аллана / А.Ю. Вахлаков, В.М. Корогод, С.В. Головач // Тез. допов. на Міжнародній наук.-техн. конф. «Приладобудування. Стан і перспективи 2013». – 2013.

Здобувачем виконано експериментальне дослідження випадкових процесів і визначення точностних параметрів лазерного гіроскопа.

12. Головач С.В. Комплексная термокомпенсация трехосного акселерометра / С.В. Головач // Тез. допов. на Міжнародній наук.-техн. конф. «Приладобудування. Стан і перспективи 2015». – 2015. – С.46-47.

13. Головач С.В. Результаты применения метода алгоритмической компенсации температурных погрешностей для выходных сигналов трехосного акселерометра / С.В. Головач // 2-га Українська науково-технічна конференція

«Спеціальне приладобудування: стан і перспективи»: тез. допов./ КП СПС «Арсенал». – 2016. – С.101-102.

АНОТАЦІЯ

Головач С.В. Методи випробувань та калібрування безплатформенних інерціальних навігаційних систем. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.03 – гіроскопи та навігаційні системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2017 р.

Дисертація присвячена розробці методів випробувань та калібрувань безплатформенних інерціальних навігаційних систем (БІНС). Метою дисертаційної роботи є розробка і вдосконалення методів випробувань та калібрування БІНС, що дозволяють підвищити точність та ефективність визначення параметрів детермінованих та випадкових процесів у їх вихідних сигналах.

Виконано інформаційно-аналітичний огляд стану проблеми у результаті якого була обґрунтована достатня кількість випробувань для отримання параметрів для забезпечення функціонування БІНС з необхідною точністю у статичних умовах. На основі методу варіації Алана розроблено методи статичних випробувань, які вдосконалено використанням вейлет-фільтрації для сигналів лазерних гіроскопів та використанням моделювання температури саморозігріву для сигналів акселерометрів.

Для температурних випробувань розроблено метод визначення та алгоритмічної компенсації температурних похибок тривісного блоку акселерометрів у складі БІНС. Перевагами розробленого методу є значне скорочення часу випробувань при невисоких вимогах до обладнання.

У даній роботі розроблено метод стендового калібрування, що за рахунок запропонованої математичної моделі та нового підходу до розв'язку рівнянь дозволив зменшити вимоги до часу випробувань. Для підтвердження ефективності стендового калібрування було розроблено алгоритми корекції вихідних сигналів тривісних блоків лазерних гіроскопів та акселерометрів у складі БІНС. Практичне застосування результатів стендового калібрування у реальних зразках високоточних блоків інерціальних вимірювачів та отримані результати довели його ефективність та практичну цінність.

Ключові слова: випробування БІНС, калібрування, інерціальні датчики, корекція сигналів.

АННОТАЦИЯ

Головач С.В. Методы испытаний и калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.03 – гироскопы и навигационные системы. – Национальный

технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» Министерства образования и науки Украины, Киев, 2017 г.

Диссертация посвящена исследованию методов испытаний и калибровок бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Целью исследования является разработка и совершенствование методов испытаний и калибровки БИНС, позволяющие повысить точность и эффективность определения параметров детерминированных и случайных процессов в их первичных сигналах.

Выполнен информационно-аналитический обзор состояния проблемы в результате которого было обосновано достаточное количество испытаний для получения параметров для обеспечения функционирования БИНС с необходимой точностью в статических условиях. Теоретически рассмотрены методы, позволяющие получать параметры БИНС при различных условиях испытаний. В частности, в работе рассмотрены методы определения параметров случайных процессов в сигналах высокоточных лазерных гироскопов и маятниковых акселерометров при статических испытаниях. На основе метода Вариации Алана разработаны методы испытаний, которые усовершенствованы использованием вейлет-преобразования для сигналов лазерных гироскопов и использованием моделирования температуры саморазогрева для сигналов акселерометров. Обосновано увеличение точности при графическом способе определения параметров Вариации Алана для первичных сигналов БИНС.

Разработан новый метод температурных испытаний БИНС, который включает в себя методику проведения лабораторных испытаний с циклограммой работы температурной камеры, способ определения функциональной зависимости от температуры детерминированного смещения нулей и масштабных коэффициентов трехосного акселерометра, а так же алгоритм коррекции температурной погрешности измерительных каналов акселерометров. Метод алгоритмической температурной компенсации основан на индикации статических и динамических режимов изменения температуры воздействующей на блок инерциальных датчиков и компенсации этих воздействий в режиме реального времени. Преимуществами разработанного метода является значительное сокращение времени испытаний при невысоких требованиях к испытательному оборудованию. Внедренные в опытные образцы алгоритмы коррекции температурной погрешности показали высокую эффективность и практическую ценность при проведении проверочных испытаний в лабораторных условиях.

Метод стендовой калибровки БИНС в данной работе включает в себя метод калибровки трехосного блока акселерометров и трехосного блока лазерных гироскопов. Новый метод калибровки разработан исходя из статических условий применения исследуемой БИНС. Методы стендовой калибровки для трехосных блоков лазерных гироскопов и акселерометров за счет использования алгебры кватернионов при решении уравнений с искомыми параметрами калибровки не требуют большого количества исходных данных, полученных в результате лабораторных испытаний, что в свою очередь сокращает затраты времени на проведение калибровок. Минимизация времени проведения испытаний в стендовой

калибровке так же была достигнута путем учета результатов статических испытаний, полученных в данной работе. Для повышения эффективности калибровки в методе применялся подход, который основан на определении некоторых групп калибровочных параметров, а именно масштабных коэффициентов и перекрестных связей измерительных осей, в связанном состоянии при условии их дальнейшего учета в таком виде в алгоритме коррекции. Подтверждение практической ценности и эффективности стендовой калибровки было достигнуто путем применения полученных параметров для разработанных алгоритмов коррекции выходных сигналов высокоточных трехосных блоков лазерных гироскопов и акселерометров в составе БИНС.

Ключевые слова: испытания БИНС, калибровка, инерциальные датчики, коррекция сигналов.

ABSTRACT

Golovach S. Methods of testing and calibration strapdown inertial navigation systems. – Manuscript.

Thesis for a candidate scientific degree on specialty 05.11.03 – gyroscopes and navigation systems. – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute by Igor Sikorsky" by Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

This research focuses on the methods of testing and calibration strapdown inertial navigation system (SINS). The aim of the thesis is to develop and improve methods of testing and calibration SINS that provide the accuracy and efficiency of determining the parameters of deterministic and stochastic processes in their output signals.

There have been performed information-analytical review for the problem of testing parameters for the functioning of SINS with the required accuracy in static conditions. Theoretically discussed methods for obtain parameters SINS during testing in different conditions. In particular, the paper describes the methods of determining the parameters of stochastic processes signals in high precision laser gyroscopes and pendulum accelerometers during the static test. On the basis of Allan variance developed improved test methods by using wavelet for filtering signals of laser gyroscopes, and by using simulation temperature self heating for correction accelerometers signals.

The method for determined and compensation temperature error for the triaxial accelerometers unit under SINS construction was developed. The advantage of the proposed method is a significant reduction in the testing time by low requirements for testing equipment. The algorithms of error correction temperature showed high efficiency and practical value during application in the studied sensors.

Stand calibration methods in this study was developed on the base of scalar calibration method and includes calibration method for triaxial accelerometer unit and triaxial laser gyroscope unit. For confirm the efficiency of static calibration correction algorithms were developed. The results of practical application the methods of stand calibration in real inertial units proved the efficacy and practical value of the developed method calibration SINS.

Keywords: SINS testing, calibration, inertial sensors, signal correction.