

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГАЛИЦЬКИЙ ВЯЧЕСЛАВ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 531.77:53 088 (043.3)

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ЗМЕНШЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПОХИБОК ПРИ
ВИМІРЮВАННІ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ**

05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: заслужений метролог України,
доктор технічних наук, професор
КВАСНІКОВ Володимир Павлович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри комп'ютеризованих
електротехнічних систем та технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
КИРИЧУК Юрій Володимирович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
в.о. завідувача кафедри приладобудування;

доктор технічних наук, доцент
ДУДНІК Андрій Сергійович,
Київський національний університет
ім. Т.Шевченка, доцент кафедри
мережевих та інтернет технологій.

Захист відбудеться «13» травня 2021 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.062.18 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1, ауд.11-311.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий «13» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



А.П. Стахова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний стан розвитку авіаційної, машинобудівної, енергетичної та інших галузей народного господарства характеризується швидким розвитком приладів керування рухомими об'єктами та інформаційно-вимірювальними системами. Це вимагає постійного підвищення точності засобів автоматизації процесу вимірювання механічних величин.

Пошук нових підходів до розробки методів, моделей та алгоритмів функціонування приладів вимірювання кутової швидкості рухомих об'єктів, обумовлений необхідністю розробки датчиків кутової швидкості та прискорення з високою точністю та швидкодією з покращеними метрологічними характеристиками.

В зв'язку з необхідністю створення високоточних систем керування рухомими об'єктами актуальним є дослідження похибок системи вимірювання кутової швидкості та її функціональних елементів, аналіз математичної моделі похибок, засобів вимірювання, а також методів та алгоритмів обробки навігаційної інформації, що враховують особливості умови роботи сенсорів.

Дослідження процесу вимірювання кутової швидкості електротехнічних комплексів та систем, з великим, і наперед невизначеним, числом ступенів вільності їхніх рухомих частин, є домінуючою науково-практичною задачею, що зумовлена підвищенням точності та швидкодії вимірювань.

Сучасні засоби вимірювання механічних величин розроблені з застосуванням передових технологій і включають з комп'ютерним управлінням і зберіганням даних. Вимірювальні системи кутової швидкості та прискорення об'єктів дають можливість отримувати інформацію з високою точністю, здійснюють комп'ютерну корекцію похибок, обробки результатів вимірювання. Реалізується обробка даних положення рухомих об'єктів, їх віртуальних моделей з метою аналізу відхилень їх показників від номінальних.

Реальні процеси визначення похибок при вимірюванні кутової швидкості та прискорення рухомих об'єктів характеризуються нелінійними залежностями, високим рівнем шумів, змінними умовами функціонування, що обумовлюють зміну характеристик контрольованих об'єктів. Тому, проблема вирішення ефективності систем управління рухомими об'єктами представляє собою складне наукове завдання, що полягає в розробці моделей і методів зменшення динамічних похибок при вимірюванні кутової швидкості рухомих об'єктів.

Значний вклад у розвиток наукового підходу в цій галузі зробили видатні вітчизняні та зарубіжні вчені: Бабаєв О.А., Безвесільна О.М., Бесекерський В.А., Бублик Г.Ф., Булгаков Б.А., Воронов А.А., Збруцький О.В., Костоков В.І., Одинцов А.О., Павловський М.А., Пельпор Д.З, Ривкін С.С., Рижков Л.М., Самотокін Б.Б., Федоров С.М., Чемоданов Б.К. та ін.

Метрологічне забезпечення процесу вимірювання кутової швидкості, що використовувалось до теперішнього часу не завжди задовільняє вимоги по точності вимірювання до виробу. До цього часу не встановлено оптимальний вибір способів та засобів вимірювання кутової швидкості в цілях підвищення точності вимірювання.

Недоліками існуючих систем є відсутність повної адаптації до зміни умов навколишнього середовища, відсутність визначення критичних моментів виміру та невисока точність. Необхідність розв'язання задач зменшення похибок в реальному часі висуває певні вимоги, як до самих алгоритмів управління та програмно-математичного забезпечення системи, так і до технічних засобів, що їх реалізують.

Тому, на даному етапі гостро стає питання адаптації системи вимірювання кутової швидкості рухомих об'єктів в умовах дії дестабілізуючих факторів, що призведе до зменшення динамічних похибок, розробки математичних моделей похибок вимірювання, методів та алгоритмів їх зменшення.

Таким чином, наукова задача розробки методів, засобів, методик та технічної реалізації інтелектуальних вимірювальних систем кутової швидкості є актуальною та має важливе значення для розвитку приладобудування та метрологічного забезпечення з метою вирішення широкого кола вимірювальних задач.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до наукового напрямку кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, відповідно до закону України №3715-VI «Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні», зокрема, «Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки», а також пов'язана з держбюджетною тематикою Міністерства освіти і науки України в науково-дослідній роботі №125-ДБ17 «Методологія побудови сучасних дистанційних інформаційно-вимірювальних систем» (державний реєстр. номер 0117U002367), де автор був виконавцем (підрозділи 3.4).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є вирішення важливої науково-технічної задачі підвищення точності вимірювання кутової швидкості за рахунок удосконалення існуючих методів проектування датчиків кутової швидкості та прискорення з покращеними метрологічними характеристиками.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні прикладні задачі:

1. Провести аналіз існуючих методів і засобів вимірювання кутової швидкості, прискорення рухомих об'єктів та систематизувати відомі теоретичні підходи, що покладено в основу їх побудови. Проаналізувати складові похибки первинних перетворювачів.

2. Розробити математичну модель похибок системи керування рухомим об'єктом. Розробити модель похибок при визначенні кутової швидкості та прискорення, а також методику комп'ютерного моделювання процесу вимірювання кутової швидкості з підвищеними метрологічними характеристиками.

3. Удосконалити чутливий елемент датчика кутової швидкості, який дає можливість значно підвищити точність вимірювання кутової швидкості та скоротити трудомісткість їх виготовлення. Розробити математичні моделі похибок датчика кутової швидкості, які обумовлені конструкцією його чутливого елементу.

4. Розробити контрольно-вимірювальний комплекс по збору, обробці та представленню результатів вимірювання кутової швидкості датчиком з розширеним діапазоном вимірювання в цілях реалізації запропонованих методів, моделей та стенду для метрологічної атестації датчика.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання кутової швидкості електромеханічних комплексів та систем з різним числом ступенів вільності їх рухомих частин.

Предмет дослідження – методи, математичні моделі і засоби вимірювання кутової швидкості тіл обертання електромеханічних комплексів та систем.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети і розв'язання окресленого кола задач основними методами дослідження є: математичні методи класичного аналізу і фізичні методи аналітичної механіки для математичної ідентифікації узагальненої системи вимірювання кутової швидкості; методи експериментальної електромеханіки для розробки та дослідження нових методів і засобів вимірювання кутової швидкості електротехнічних комплексів і систем з обертальною та складною формами руху; теорії похибок, обробки сигналів для аналізу та розробки моделей похибок; теорії імовірностей та математичної статистики для теоретичного обґрунтування оптимального вибору вимірювальних параметрів.

Наукова новизна отриманих результатів. Науково обґрунтовано новий підхід щодо вимірювання кутової швидкості за рахунок удосконалення існуючих методів і сенсорів вимірювання кутової швидкості та прискорення з покращеними метрологічними характеристиками в умовах обмеженого обсягу вимірювальної інформації.

В роботі отримані такі нові наукові результати:

1. В перше розроблено метод корекції динамічних похибок системи амортизації для вимірювання кутової швидкості. Розроблено датчик, який відрізняється від аналогічних меншими габаритами, але більш пружними характеристиками і дає змогу зменшити вплив дестабілізуючих факторів та підвищити чутливість приладу;

2. Вперше розроблено метод компенсації похибок датчика моментів маятникового акселерометра компенсаційного типу, з використанням датчика моменту зі стабільною крутизною $K_{упр}$, яка в свою чергу залежить від

величини індукції і коерцитивної сили магніту, який використовується при виготовленні датчика моменту, що дало змогу забезпечити точність приладу при роботі в складі складних гіроскопічних платформ;

3. Подальшого розвитку отримав метод автоматичного керування сигналом системи стабілізації для зменшення впливу похибок, що дає можливість підвищити точність вимірювання кутової швидкості та прискорення. На відміну від існуючих аналогів система автоматичного керування є стійкою у великому діапазоні вимірювань;

4. Удосконалено метод балансування та атестації пружного підвісу датчика кутової швидкості, що дало змогу зменшити незалежну складову швидкості дрейфу від прискорення 0,2 кут. град/ч.

5. Удосконалений метод цифрової компенсації на основі TEDS, що дає можливість скорегувати чутливий елемент під час його роботи в широкому діапазоні температурних впливів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

Запропоновані методи і засоби вимірювання кутової швидкості, які забезпечують зменшення впливу дестабілізуючих факторів, а саме: метод зменшення впливу температурних похибок, що діють на чутливий елемент під час його роботи; моделі і методи розрахунку пружних характеристик пружного амортизатора; стенд для метрологічної атестації та перевірки приладів та відтворення реальних навантажень, що виникають у гіростабілізованих платформах; подальший розвиток теоретичних основ побудови інтелектуальної вимірювальної системи механічних величин з підвищеними метрологічними характеристиками, що дало змогу забезпечити високу точність перетворення (0,001-0,01)%, а також точність динамічного налаштування ДНГ (0,002%), нестабільність періоду обертання не гірше 0,01% на інтервалі часу вимірювання періоду 0,167 с.

Запропонована конструкція та модель системи вимірювання кутової швидкості дозволили підвищити точності визначення швидкості в 1,7 разів порівняно з аналогами, а також дозволяють визначити метрологічні характеристики приладу.

Використані результати дисертації дали змогу покращити в 1,3 рази технічні та метрологічні параметри гіротахометру ГТ-46 по точності.

Впровадження результатів роботи. Розроблені і впроваджені наукові положення, висновки і практичні рекомендації на ПАТ «НВО «Київський завод автоматики» та в навчальному процесі Національного авіаційного університету і підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. В отриманих наукових і практичних результатах, які викладені в дисертаційній роботі, внесок здобувача полягає в самостійному виконанні теоретичної і практичної частин роботи, а також інтерпретації отриманих результатів та проведенні експериментальних досліджень. Автором самостійно отримані основні положення, які винесені на захист. Це інноваційне конструкторське рішення зменшення впливу дестабілізуючих факторів, що діють на блок гіроскопів під час роботи

Примечание [A1]: Краще плодати списком з пунктами

Примечание [A2]: Що це?

Примечание [A3]: Підберіть інше слово

гіростабілізованої платформи. Запропоновано методику зменшення похибок, що виникають у робочих частинах приладу. Автор приймав участь у розробці та апробації вимірювальної системи для підвищення точності визначення кутової швидкості та доповнену математичну модель, що дозволило покращити закон керування системою стабілізації, запропоновану унікальну конструкцію стенду, яка дозволяє імітувати робочі навантаження систем стабілізації та проводити метрологічну атестацію приладів.

В роботах [3,8] автором запропонована унікальна методика балансування резонатора датчика та наведено основні технічні та метрологічні характеристики. Автором розроблена математична модель апаратних систем для вимірювання кутових швидкостей. В роботі [5] побудована структура заводостійких засобів вимірювання датчиків кутової швидкості. В роботах [2, 6] розроблено методику обробки сигналів датчиків. В роботах [1,4] проведено дослідження щодо особливості вимірювання параметрів деталей при виготовленні акселерометра. В роботах [7, 9, 10] запропоновано методику вимірювання серединної похибки цифрових стабілізаторів озброєння, що дозволило вести перевірки одного з основних параметрів стабілізації динамічної похибки приладу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались на науково-технічних конференціях: «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» «ІРТК-2017», (м. Київ, НАУ, 2017 р.); Міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» «ВКДТС-2017, 2018», (м. Вінниця, 2017 р., 2018 р.); «Інтегровані інтелектуальні роботи технічні комплекси» «ІРТК-2020» (м. Київ, НАУ, 2020 р.).

Результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 12 наукових працях, із яких: 1 входить до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 7 статей в наукових фахових виданнях України та 4 публікації за матеріалами доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з переліку умовних позначень і скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури по кожному розділу, загального висновку та додатків. Основний зміст дисертації викладено на 130 сторінках. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 162 сторінки, який містить 43 рисунки, 14 таблиць і 3 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі дисертаційної роботи проведено аналіз літературних джерел, розглянуто історію та наукові досягнення у сфері розвитку приладів та систем вимірювання кутової швидкості. Проведено аналіз світових тенденцій розробок датчиків кутової швидкості, алгоритмів, методик та методів зменшення динамічних похибок при дії зовнішніх збурень.

Розглянуто та проаналізовано три режими роботи датчиків кутової швидкості. Представлені блок схеми систем управління стоячою хвилею для кожного режиму роботи сенсорів. Встановлено, що при вимірюванні малих кутових швидкостей необхідно використовувати режим ДКШ або диференційний режим, а інтегруючий режим доречно застосовувати при вимірюванні великих кутових швидкостей і таких, що швидко змінюються.

Проведено аналіз науково-технічної літератури стосовно існуючих методів та засобів компенсації дестабілізуючих сил та факторів, систем ударо- і віброзахисту прецизійних приладів вимірювання і контролю кутової швидкості. Показано, що одним із найбільш перспективних методів є методи компенсації похибок демпфуючого елемента акселерометру та зниження вібровпливу на блок пристроїв.

Визначені основні дестабілізуючі фактори датчиків кутової швидкості, що пов'язані з неідеальністю виготовлення резонатора. Графічно представлені похибки інтегруючого режиму роботи датчиків кутової швидкості, що обумовлені різною жорсткістю і різною добротністю чутливого елемента. Представлені і проаналізовані рівняння динаміки похибок датчиків кутової швидкості і дано їх рішення для випадку роботи датчиків кутової швидкості в режимі ДШК. У результаті такого рішення отримані вирази для масштабного коефіцієнту і зменшення похибки ДКШ параметри чутливого елемента.

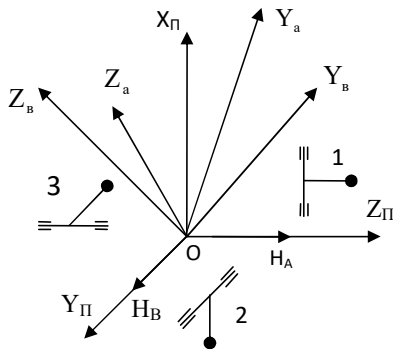
У другому розділі було виведено математичну модель вимірювань диференційним методом інтелектуального вимірювального приладу кутової швидкості з урахуванням різних дестабілізуючих факторів (вібрація, температура, вологість, удари).

Розроблено математичну модель вимірювальної системи керування рухомими об'єктами, що дає змогу проаналізувати механізми впливу зовнішніх факторів на точність пристроїв вимірювання кутової швидкості.

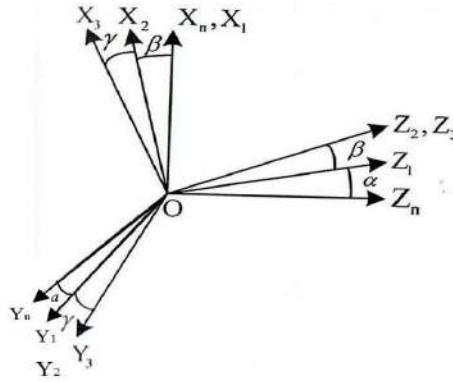
Показано, що положення осей чутливості акселерометрів утворюють ортогональний тригранник, що збігається з осями системи координат $Ox_n Y_n Z_n$, а осі чутливості динамічно налаштованого гіроскопу розгорнуті відносно осі Ox_n на кут 45° град. і розташовані в номінальному положенні

Примечание [A4]: Що це?

в площинах $OY_{\Pi}X_{\Pi}$ і $OZ_{\Pi}X_{\Pi}$, відповідно для одного і другого датчика кутової швидкості (рис.1), які умовно



позначені А і В.



ординат, пов'язані з датчиків кутових і осями трьох в номінальному $Z_{\Pi}Z_{\Pi}$

Рисунок 2 – Похибки орієнтації осей чутливості кожного акселерометру щодо приладової системи координат

Проаналізовано осі співвідношення кінетичних моментів датчиків кутової швидкості та визначено їх відповідність напрямлення по осям Z_{Π} і Y_{Π} . Проведені дослідження акселерометрів з широтно-імпульсним модулятором в контурі зворотного зв'язку показали, що застосування формувача широтно-імпульсного модулятора зі зазначеною розрядністю ($m_a = 8$) приводить до підвищення рівня шумів при обробці вихідного сигналу акселерометра в центральному блоці приладової системи. В результаті проведення експерименту вдосконалено формувач широтно-імпульсного модулятора та доведено до кількості розрядів $m_a = 11$, що дало можливість зменшити рівень шумів при обробці результатів вимірювання датчиків.

Розроблена математична модель датчиків кутової швидкості об'єкта для розрахунку впливу похибки орієнтації осей чутливості кожного з трьох акселерометрів відносно приладової системи координат. Визначено похибки орієнтації осей чутливості кожного акселерометру щодо приладової системи координат, що задано відповідно трьома поворотами $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ ($i=1,2,3$) (рис. 2). При цьому кожний поворот охарактеризовано своєю матрицею направляючих косинусів.

1-ий поворот на кут α 2-ий поворот на кут β 3-ій поворот на кут γ
 A_1 A_2 A_3

Примечание [A5]: Спочатку подано посилання в тексті на рис. Потім подано рис, а не навпаки

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix}$$

Розроблено та проаналізовано вихідні кодові сигнали вимірювального приладу кутової швидкості, що визначаються за інтервал часу обміну інформацією з центральним блоком приладової системи. Встановлено, що при відкиданні молодших «шумливих» розрядів суми сигналів усічених кодів підвищено точність вимірювання кутової швидкості в 2^m - раз і доводиться до величини ціни молодшого розряду.

Для отримання інформації із приладової системи вимірювання кутової швидкості рухомих об'єктів по каналу вимірювання приросту уявних прискорень акселерометрів, розроблена математична модель, яка має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{Zp3} & N_{BZp3} \\ \gamma_{Xp1} & N_{BXp1} \\ \gamma_{Yp2} & N_{BYp2} \end{bmatrix} \text{ відповідно } nT_0 A_p \begin{bmatrix} a_{xn} \\ a_{yn} \\ a_{zn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де $A_p = \begin{bmatrix} 1 & \gamma_3 & -\beta_3 \\ -\gamma_1 & 1 & \alpha_1 \\ \beta_2 & -\alpha_2 & 1 \end{bmatrix}$, матриця похибки орієнтації осей чутливості

акселерометрів, $\gamma_{Xp1} = [\gamma_{Xp1}^* + \gamma_{Xp1t}^*(t - t_0)](1 + \gamma_{Xp1}^v)$, $\gamma_{Yp2} = [\gamma_{Yp2}^* + \gamma_{Yp2t}^*(t - t_0)](1 + \gamma_{Yp2}^v)$, $\gamma_{Zp3} = [\gamma_{Zp3}^* + \gamma_{Zp3t}^*(t - t_0)](1 + \gamma_{Zp3}^v)$ - ціни молодшого розряду вихідних кодів акселерометрів з осями чутливості Y_{p1} , Z_{p2} , X_{p3} і осями підвісів X_{p1} , Y_{p2} , Z_{p3} відповідно; N_{BZp3} , N_{BXp1} , N_{BYp2} - значення сумарних кодів з виходів відповідних акселерометричних каналів Z_{p3} , X_{p1} , Y_{p2} за час nT_0 ; γ_{Xp1}^* , γ_{Yp2}^* , γ_{Zp3}^* - значення ціни молодшого розряду вихідних кодів 1, 2, 3 акселерометрів, що паспортизуються; γ_{Xp1t}^* , γ_{Yp2t}^* , γ_{Zp3t}^* - коефіцієнт лінійної залежності, компенсаційних змін ціни молодшого розряду від температури, a_{xn} , a_{yn} , a_{zn} - лінійні прискорення на осі приладової системи координат.

Показано, що отримані матриці перетворення вихідного сигналу від приладової системи координат до осей чутливості динамічно налаштованого гіроскопу, з урахуванням похибок їх орієнтації, дали змогу розрахувати похибки орієнтації як відношення середніх значень різниці, вихідних сигналів відповідних датчиків при завданні вхідних впливів. Сформовано блочну матрицю $C = \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \end{bmatrix}$, де матриці C_a , C_b наведені при описі математичної моделі ДКШ. Шляхом викресленням по одному рядку матриці C , де чотири матриці C_i , де $i=1, 2, 3, 4$ - номер вилученого рядку. Вектор-стовпець приросту кутів повороту $[S_d] = [\Delta\beta_{Ya2} \Delta a_{Za2} \Delta\beta_{Yb2} \Delta a_{Zb2}]^T$. Шляхом викресленням з вектора $[S_d]$ по чергово по одному елементу, записано чотири вектори $[S_{di}]$, де $i=1, 2, 3, 4$ - номер викресленого елементу.

Отримано рівняння для вектору приросту інтегралів в астатичній системі координатного порівнювання від складових кутової швидкості виробу по осям приладової системи координат $OX_n Y_n Z_n$:

$$[\Delta\theta_n] = \begin{bmatrix} \Delta\theta_{Xn} \\ \Delta\theta_{Yn} \\ \Delta\theta_{Zn} \end{bmatrix} = 0,25 \sum_{i=1}^4 [C_1^{-1}] [S_{di}]. \quad (2)$$

де $\Delta\theta$ - вектор приросту інтегралів.

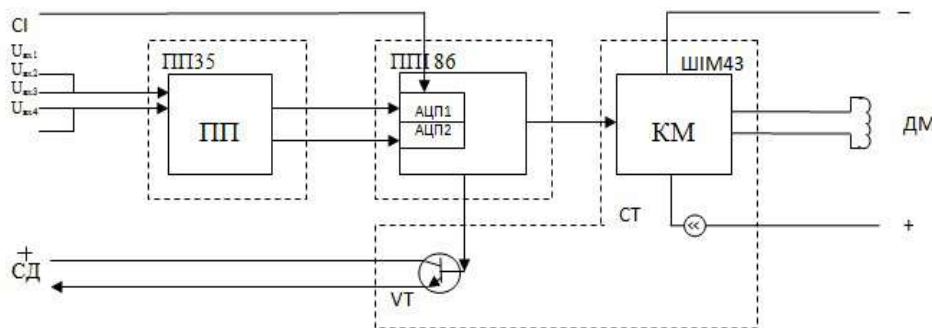
Одержані результати дають можливість вдосконалити вихідні показники за рахунок усереднення значень приросту кутів повороту системи при виконанні вказаного перетворення до приладової системи координат і як наслідок цього можливе осереднення похибок датчиків кутової швидкості, а також похибок орієнтації осей чутливості.

Визначено вплив додаткових складових похибок вимірювального сигналу, а також необхідність забезпечити алгоритмічну компенсацію похибки в системі керування складових швидкостей дрейфу залежну від прискорень. Результати моделювання показали, що середній ризик з урахуванням регулювання матриці може бути зменшений в 1,7 рази.

Третій розділ присвячено питанню розробки функціональної та структурної схем системи вимірювання кутової швидкості, методиці проведення метрологічної атестації акселерометра, компенсації похибки в акселерометрі та оцінки метрологічних характеристик.

Вперше побудована модель вимірювача кутової швидкості та прискорення сигналу на базі прецизійного маятникового акселерометра компенсаційного типу, що забезпечило демпферування дестабілізуючих факторів та ефективно інтегрує високочастотні складові, які присутні в сигналі датчика зворотнього зв'язку. Результати вимірювання кутової швидкості представлені в цифровому виді, що формується безпосередньо в контурі дискретного зворотнього зв'язку з широтно-імпульсним модулятором, який забезпечує високу точність перетворення до (0,001-0,01)%. Таке схемотехнічне рішення дозволило вдосконалити схему отримання сигналу з датчиків в аналоговому вигляді з подальшим цифровим перетворенням.

Акселерометр АМ06 виконаний по функціональній схемі наведений на рисунку 3.



Примечание [А6]: Не зрозуміло про що йде мова

Рисунок 3 - Функціональна схема акселерометра типу АМ06

Показано, що до складу зворотнього зв'язку входять первинний підсилювач, мікроконтролер, мостовий комутатор і стабілізоване джерело струму (рис.4).

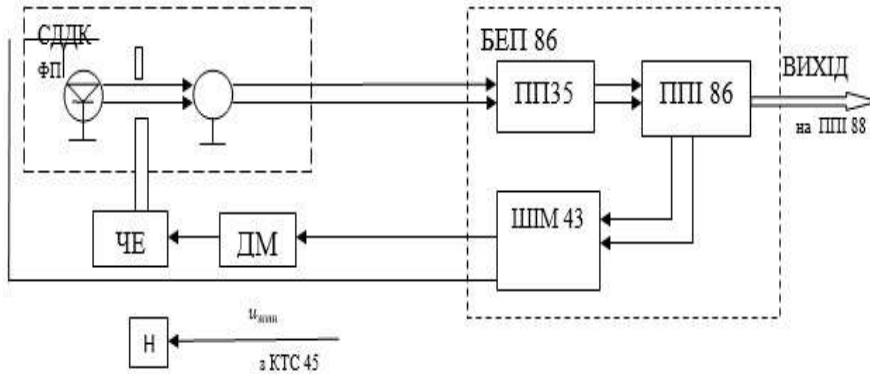


Рисунок 4- Структурна схема контуру зворотного зв'язку

Показано, що навантаження мостового комутатора є обмотка датчика моменту чутливого елемента акселерометра, а навантаженням транзистора VT - світлодіод оптопарі чутливого елемента (рис.4).

Встановлено, що напруга з двох виходів підсилювача потужностей надходить на входи двох аналого-цифрових перетворювачів. В їх склад входять мікроконтролери типу С8051F131, які програмним шляхом формують передавальну функцію контуру зворотнього зв'язку по струму датчика моменту і по потужності випромінюванні світлодіода оптопарі чутливого елемента.

Для підвищення точності вимірювання кутової швидкості показано, що різниця кодів з виходів двох аналого-цифрових перетворювачів визначається (з урахуванням передавальної функції, яка формується в мікроконтролері) в кожному циклі за період імпульсу управління комутатором мостового (КМ) на виході ШІМ, що підключає обмотку ДМ для проходження струму в одному з напрямків. Встановлено, що при рівності кодів середній струм через датчик моменту за цикл дорівнює нулю.

Для адитивної корекції похибок розроблено спосіб визначення значення встановленого струму через світлодіод оптопарі, що сумується з двох аналогово-цифрових перетворювачів. Тривалість циклу роботи мікроконтролеру визначається частотою проходження синхроімпульсів, що надходять з ГСЧ (входить до складу ШІМ43).

Розроблений алгоритм роботи мікроконтролеру, що реалізує математичну модель компенсації стаціонарних складових похибок чутливого елемента та термокомпенсацію зміни характеристики акселерометра в діапазоні робочих температур і видачу результатів вимірювань по інтерфейсу в пристрій збору інформації (ППІ88).

Примечание [A7]: є скорочення на рис., які потребують розшифрування

Примечание [A8]: розшифрувати

Для обробки аналогових сигналів в сервісній електроніці акселерометра запропоновано використовувати серію операційних підсилювачів і електронних ключів фірми “Analog Devices”. Цифрова обробка сигналів проводиться з використанням дискретної логіки та мікроконтролерів фірми “Silicon Laboratory”.

В пристроях (ППІ86, ШІМ43, ПП35) з підвищеними вимогами до метрологічних характеристик застосовують високостабільні металорезистори і термокомпенсовані конденсатори групи NPO.

На входи ППІ надходять вихідні сигнали $U_{вх1} \div U_{вх4}$ з фотодіодів оптичній чутливого елемента. Вихідні струми 4-х фотодіодів оптичній парно підсумовуються на 2-х входах ПП, який складається з двох ідентичних каналів. Кожний каскад підсилювача потужності перетворює суму струмів двох фотодіодів в напругу, яка додатково підсилюється вихідними каскадом підсилювача потужності, що мають характеристику фільтру низьких частот 2-го порядку з частотою зрізу 160 Гц при максимально можливій крутизні амплітудно-частотній характеристиці в перехідній області.

В процесі відпрацювання макетного зразку чутливого елемента акселерометра отримано амплітудно-частотні характеристики (рис.5).

Враховуючи розкид вимірювальних значень амплітуди при визначенні Δm для випадків нижнього і верхнього положення маятника, варто усереднити результати розрахунків додаткової маси, на яку потрібно збільшувати чи зменшувати величину вантажу балансування відповідно до співвідношення:

$$\Delta m_{\text{ср}} = \frac{ml}{r \cdot K_{\text{дк}}} \left[\varepsilon \left(\frac{U_{\text{нм}} + U_{\text{вм}}}{2} \right) + \frac{U_{\text{нм}} - U_{\text{вм}}}{2} \right] \quad (3)$$

де ml - поздовжня маятниковість; r - радіус на якому відбувається зміна маси; $U_{\text{нм}}$ - вихідний сигнал датчика кута при нижній маятниковості; $U_{\text{вм}}$ - вихідний сигнал датчика кута при верхній маятниковості; $K_{\text{дк}}$ - крутизна датчика кута.

Показано, що після відповідних перетворень розрахунку Δm величину ε залежить від жорсткості підвісу K_y та введеним позначенням $\nu = \frac{U_{\text{вм}}}{U_{\text{нм}}}$. Отримані наступні співвідношення для визначення додаткової маси вантажу балансування, які поєднують ε і ν :

$$\left. \begin{aligned} \Delta m &= \frac{2ml}{r \cdot K_{\text{дк}}} \cdot \frac{\nu}{\nu - 1} U_{\text{нм}} \\ \Delta m &= \frac{2ml}{r \cdot K_{\text{дк}}} \cdot \frac{1}{\nu - 1} U_{\text{вм}} \end{aligned} \right\} , \quad (4)$$

де Δm - позначена додаткова маса.

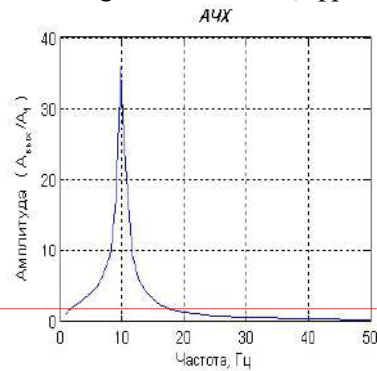


Рисунок 5- Амплітудно-частотні характеристики акселерометра чутливим елементом

Примечание [A9]: ??

Результати моделювання показали, що використовуючи виведені формули дають змогу визначити додаткову масу, на яку потрібно збільшувати чи зменшувати величину вантажу при балансуванні чутливого елемента. Запропонований новий метод балансування чутливого елемента з використанням ефекту лазерного випаровування матеріалу з поверхні вантажу балансування, що дає можливість більш точно балансувати чутливий елемент, так як за одну операцію вдається випаровувати (0,03÷0,2) мг металу.

Експериментальним методом встановлено, що для деталей виготовлених з бронзи, лазерне випаровування металу відбувається інакше, ніж у деталей зі сталі.

Вдосконалено конструкцію пружного елемента, який є одним із основних елементів датчика акселерометра, що зумовлює його метрологічні характеристики.

На рис.6 показані основні геометричні параметри пружного елемента підвісу датчика: b – ширина пружного елемента; h_0 – товщина пружного елемента в його найбільш вузькій частині; ρ – радіус циліндричних отворів, що утворюють пружний елемент.

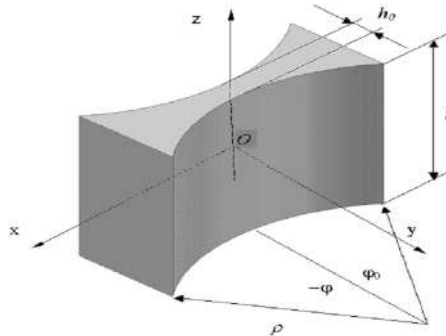


Рисунок 6 – Пружний елемент підвісу датчика акселерометру

В результаті оцінки чутливості пружного підвісу чутливого елемента чутливість встановлено на основі величини приросту вихідного сигналу датчика кута при зміні кутів вимірювання чутливого елемента, на кути ± 10 кут.с, що відповідає діапазону лінійних прискорень $\pm 5 \cdot 10^{-5} g$. Оцінка проведена на двох чутливих елементах показала, що приріст сигналу знаходилося в межах (10÷20) мкВ.

Розроблений алгоритм компенсації температурної похибки датчика моменту. Стабільність передавального коефіцієнта приладу АМ06, в значній мірі, залежить від величини і стабільності крутизни ДМ, $K_{упр}$, яка в свою чергу, залежить від величини індукції і коерцитивної сили магніту і його температури:

$$B_{rt} = B_{r_{20}} \cdot \left[1 - \frac{\alpha(B_{r_{20}}) \cdot (t_1 - 20)}{100} \right] \quad (5)$$

$$H_{rt} = H_{r_{20}} \cdot \left[1 - \frac{\beta(H_{r_{20}}) \cdot (t_1 - 20)}{100} \right],$$

де B_{rt} – остаточна індукція постійного магніту; H_{rt} – коерцитивна сила постійного магніту; $B_{r_{20}}$ і $H_{r_{20}}$ – індукція і коерцитивна сила при $20^\circ C$; $\alpha(B_r)$ – коефіцієнт оборотних втрат остаточної індукції $\alpha(B_r) < -0.015\%/^\circ C$; $\beta(H_r)$ – коефіцієнт оборотних втрат коерцитивної сили $\beta(H_r) < -0.03\%/^\circ C$.

Відомо, що крутизна ДМ визначається по формулі:

$$K_{упр} = \frac{M_{упр}}{I_{max}}, \quad (6)$$

де $M_{упр}$ -момент управління, I_{max} -максимальний управляючий струм.

Отримано аналітичний вираз крутизни при температурі t , $K_{ДМ}(t)$ наведено формулою:

$$K_{ДМ}(t) = K_{ДМ}(t_1) - \frac{K_{ДМ}(t_2) - K_{ДМ}(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot (t - t_1), \quad (7)$$

де $K_{ДМ}(t_1)$, $K_{ДМ}(t_2)$ - крутизна при температурі t_1, t_2 , відповідно.;

Приведено результати розрахунку крутизни ДМ, яка не перевищує 0.004% при різних значеннях індукції та температури.

Визначені амплітудно-частотні і фазо-частотні характеристики вимірювання та приведена передавальна функція чутливого елементу:

$$W(p) = \frac{33340}{0,000264p^2 + 0.00081p + 1}.$$

Запропонована методика в дозволяє оптимізувати і інші параметри датчиків, якщо вважається, що вони матимуть суттєвий вплив на похибку вимірювального перетворення. Така методика виготовлення пружного елементу є підставою для проведення обґрунтованих технологічних та конструкторських заходів при створенні датчиків і загалом може служити підставою уніфікації і стандартизації типоміналів датчиків. Приведено розрахунки датчика моменту при температурі t . Похибка передавального коефіцієнту АМ06 в діапазоні температур від $-40\text{ }^\circ\text{C}$ до $+130\text{ }^\circ\text{C}$ після алгоритмічної компенсації температурної похибки по наведеній методиці не перевищує 0,004%.

У четвертому розділі була представлена структурна схема датчика кутової швидкості динамічно налаштованого гіроскопу (ДКШ ДНГ), що представляє собою електронно-механічний пристрій, вихідними сигналами якого є інформація про кутові швидкості відносно двох осей триосьової системи координат, що дає змогу забезпечити високу точність перетворення при цьому похибка складає (0,001-0,01)%. Розроблена нова структурна схема електронно-механічного пристрою датчика кутової швидкості (рис.7).

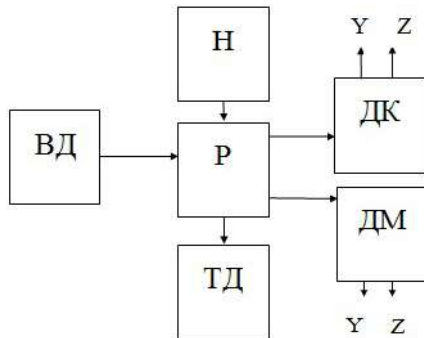


Рисунок-7 Структурна схема електронно-механічного пристрою датчика кутової швидкості, де ВД- вентильний двигун; Р- ротор; ДК- датчик кута; ДМ- датчик моменту; ТД- термодатчик; X, Y, Z – осі

моменту.

Ротор датчика є носієм кінетичного моменту і представляє собою двокільцевий підвіс на пружних перемичках, на якому знаходиться маховик, торець якого є ротором датчика кута. У внутрішньому розточуванні маховика знаходиться постійний магніт, який разом з маховиком являється ротором датчика

Примечание [A10]: подайте скорочення, де вперше говорите в тексті

Вентильний двигун (ВД) забезпечує обертання ротора датчика і являє собою двофазний двигун постійного струму з двополярною напругою живлення.

Датчик кута (ДК), що застосований в системі реєструє кутові переміщення ротора відносно чотирьох сердечників з котушками індуктивності, встановлених по окружності в корпусі під кутом 90° один до одного; котушки поєднанні в мостову схему зі штучною середньою точкою, яка формується постійними резисторами.

Розроблено електропривід з вентильним двигуном постійного струму і аналого-цифровим контуром управління, що дозволяє спростити конструкцію карданового підвісу та процес динамічного налаштування ДНГ та підвищити точність динамічного налаштування ДНГ. Дискретність зміни частоти обертання ротора-0,004 Гц (0,002%) (точності динамічного налаштування ДНГ 2 кут.град., для приладу, що практично неможливо).

Показано, що необхідна точність обертання ротора досягається після його роботи протягом 15 хв з ціллю стабілізації вихідних параметрів. Нестабільність періоду обертання не гірше 0,01% при інтервалі часу вимірювання періоду 0,167 с.

В роботі визначено кількість тепла датчика, що виділяється з нього по наступній формулі:

$$Q_{\text{п}} = \frac{qP_{\text{ГД}}t^2}{K}, \quad (8)$$

де $P_{\text{ГД}}$ - потужність, споживана датчика, Вт; t - час; K - масштабний коефіцієнт Вт·с/кал.

Визначено значення потужності $P_{\text{ГД}}$ споживана датчиком, яка споживається електроприводом $P_{\text{ЕП}}$, датчиком кута $P_{\text{ДК}}$, датчиком момента $P_{\text{ДМ}}$ і нагрівачами $P_{\text{Н}}$ по формулі:

$$P_{\text{ГД}} = P_{\text{ЕП}} + P_{\text{ДК}} + P_{\text{ДМ}} + P_{\text{Н}}. \quad (9)$$

Споживана потужність датчиків моменту $P_{\text{ДМ}}$ визначено за формулою:

$$P_{\text{ДМ}} = 2I^2R_{\text{ДМ}}, \quad (10)$$

де 2 - кількість обмоток, шт.; I - струм ДМ, А; $R_{\text{ДМ}}$ - опір обмотки ДМ, Ом.

Споживана потужність нагрівача визначається формулою:

$$P_{\text{Н}} = \frac{U^2(R_1+R_2)}{R_1 \cdot R_2}, \text{ Вт}, \quad (11)$$

де U - напруга живлення нагрівачів, В; R_1, R_2 - опір паралельно виключених нагрівачів $H1$ і $H2$, Ом.

З урахуванням рівняння, що визначають кількість втрат $Q_{\text{п}}$ на теплопередачу в місці кріплення і випромінювання в навколишнє середовище, що характеризується коефіцієнтом втрат q за одиницю часу від кількості тепла $Q_{\text{ГД}}$, що виділяється в датчику, і часу нагріву t :

$$Q_{\text{п}} = qtQ_{\text{ГД}}. \quad (12)$$

Якщо врахувати, що кількість тепла, що виділяється в датчику, визначається формулою:

$$Q_{ГД} = \frac{P_{ГД}t}{K}, \text{ кал.} \quad (13)$$

де Р- потужність, споживана датчиком, Вт; t - час,с; К- масштабний коефіцієнт Вт·с/кал , то час нагрівання дорівнює:

$$t = \frac{1}{2q} \pm \sqrt{\frac{1}{4q^2} - \frac{KQ}{qP_{ГД}}}. \quad (14)$$

Приведені основні метрологічні характеристики розробленого датчика кутової швидкості наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Метрологічні характеристики датчика кутової швидкості

Найменування метрологічних характеристик	Характер похибки	
	Систематична, не більше	Випадкова (3σ), не більше
Адитивна від прискорення, кут.град/год	$25\omega_c^*$	$0,2\omega_c^V$
Мультиплікативна від прискорення, кут.град/год·g	$15\omega_g^*$	$0,2\omega_g^V$
Нелінійна, що залежить від прискорення, кут.град/год·g	$15\omega_{KB}^*$	$0,25\omega_{KB}^V$
Залежна від квадрата прискорення, кут.град/год·g ²	$3\omega_g \text{ KB}$	-
Залежна від зміни температури, кут.град/год·°C	$0,1\Delta\omega_T$	-
Дискретність, кут.с	$0,127 \text{ } ^1\gamma_d$	$6,35 \cdot 10^{-5}$

Отримані залежності для визначення метрологічних характеристик та запропонований поворотний стенд, який забезпечує положення датчика (1-12), в комплексі з сервісною електронікою та системою вимірювання.

Для дослідження працездатності методів вимірювання кутової швидкості на рисунку 8 наведено точні характеристики датчика визначено в 12-ти положеннях щодо інерціального простору 0, X₀, Y₀, Z₀

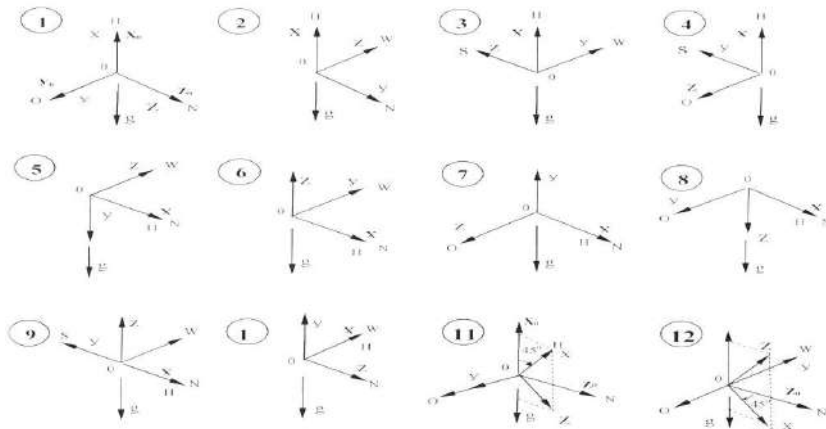


Рисунок 8 - Положення датчика на запропонованому поворотному стенді, де O, X, Y, Z – осі координат; O – схід; N – північ; S – південь; W – захід; H –

вектор кінетичного моменту; g – вектор Земного прискорення

Доведено, що інтенсивність відмов окремого елемента залежить від коефіцієнта електричного навантаження, умов експлуатації, ступеня інтеграції (ІМС), величини номіналу (резистори, конденсатори).

Представлена порівняльна характеристика технічних параметрів розробленого датчика кутової швидкості (табл.2).

Таблиця 2

Точносні характеристики розробленого датчика кутової швидкості

Характеристика	Значення	
	існуючої системи	вдосконаленої системи
Масштабний коефіцієнт, $K, 1/c \cdot mA$	226,03	226,03
Похибка масштабного коефіцієнту, $(3\sigma), \%$	0,1	0,05
Похибка масштабного коефіцієнту, $\Delta K, \%/^{\circ}C$ від зміни температури	-0,03	-0,015
Постійна часу, t, c , не менше	10	10
Час входження ротора в синхронізм, $t_{вх.}, c$, не більше	5	2
Час точностної готовності, $t_{гот.}, хв.$, не більше	14	10
Діапазон кутових швидкостей, кут.град/с, не більше	± 180	± 180
Відхилення електричних осей датчиків моментів від установчих осей, кут.с, не більше	100	60

Встановлено, що інтенсивність відмов ДКШ залежать від кількості застосування напівпровідникових приладів (оптопари, польові транзистори, діоди) та показана доцільність використання мікроконтролерів, ЦАП, АЦП. Експериментальні результати розрахунку надійності приладу (графіки, формули, таблиці по точності) дають підставу стверджувати, що вимоги по надійності виконуються завдяки проведеному аналізу видів, наслідків та

Примечание [A11]: цей рис. Не читається, в роздрукованому вигляді буде ще гірше

критичності відмов, оскільки в системі відсутнє резервування, система критична до відмови любого елемента і це призводить до відмови системи.

На основі запропонованих методів та конструктивних рішень розроблені та експериментально підтверджені методики вимірювання кутової швидкості та методи визначення зменшення впливу зовнішніх факторів, розроблено і виготовлено експериментальні зразки, стенди на базі серійного гіротахometру та центрального блоку системи керування рухомими об'єктами.

У висновках наведено основні результати досліджень, проведених у дисертаційній роботі, як теоретичних так і експериментальних.

У додатках приведено технічні і метрологічні характеристики розробленого датчика кутової швидкості з підвищеною точністю та адаптацією до зміни умов навколишнього середовища, з визначенням критичних моментів вимірювання та з точністю більшою в 1,7 рази. Приведені математичні розрахунки, схеми експериментальної установки для метрологічної атестації. Приведені протоколи та графіки зменшення динамічної похибки при вимірюванні кутової швидкості. Представлено акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ ТА ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

Головним науковим результатом роботи є наукове обґрунтування та розробка методів та моделей зменшення динамічних похибок при вимірюванні кутової швидкості рухомих об'єктів.

Проведені дослідження дозволили зробити наступні висновки:

1. Розроблена модель амортизатора, дозволяє зменшити вплив ударів та вібрацій на сенсор. Модель відрізняється від аналогічних меншими габаритами, але більш пружними характеристиками, що дає змогу зменшити вплив дестабілізуючих факторів та підвищити чутливість приладу;

2. Вперше розроблено модель компенсації похибок датчика моментів маятникового акселерометра компенсаційного типу, з використанням датчика моменту зі стабільною крутизною $K_{упр}$, яка в свою чергу залежить від величини індукції і коерцитивної сили магніту, який використовується при виготовленні датчика моменту, що дало змогу забезпечити точність приладу при роботі в складі складних гіроскопічних платформ;

3. Удосконалено метод виготовлення пружного підвісу датчика кутової швидкості, що дало змогу зменшити незалежну складову швидкості дрейфу від прискорення 0,2 кут. град/ч.

4. Проаналізовано відомі методи та засоби вимірювання кутової швидкості систем керування рухомими об'єктами, що покладені в основу їх побудови. Встановлено, що на сучасному етапі розвитку датчиків кутової швидкості актуальним є створення нових методів та засобів виготовлення з підвищеними метрологічними характеристиками, які засновані на формуванні комплексних рішень.

5. Удосконалено метод вимірювання кутової швидкості, а саме ДКШ ДНГ та прискорення АМ06 на базі прецизійного маятникового акселерометра компенсаційного типу застосувавши широтно-імпульсний модулятор, що дозволило отримати результати вимірювання в цифровому вигляді, які формуються безпосередньо в контур дискретного зворотного зв'язку. Даний метод забезпечив високу точність перетворення сигналу з відносною похибкою(0,001-0,01)%.

6. Вперше встановлено, що для акселерометрів з ШІМ в контурі зворотного зв'язку можна досягти зниження рівня шумів при обробці вихідного сигналу акселерометру в ЦБПС, доопрацювавши формувач ШІМ з розрядністю $m_a = 8$ до $m_a = 11$.

7. Розроблена модель амортизатора, яка дозволяє зменшити вплив ударів та вібрацій. Модель відрізняється від аналогічних меншими габаритами, але більш пружними характеристиками і дає змогу зменшити вплив дестабілізуючих факторів. На розробленій моделі були визначенні характеристики крутизни ДМ дослідно-розрахунковим методом в складі макетних зразків приладу при безпосередньому навантаженні чутливого елемента тарованим моментом і вимірюванням падіння напруги на вимірювальному опорі в ланцюгу зворотного зв'язку АМ. Даним методом було вираховано маси частин конструктивних елементів (шторки, котушки, вантажі і рухомий пружної пластини), розташованих з лівої та з правої сторони від площини пластини **ЧЕ**, з урахуванням допусків на їх розміри і форму. Це дозволило визначити як сумарний момент **ЧЕ**, так і момент мас, що викликають вигин пластини на кути α чи β , зміщення **ЦМ** від площини пластини, а також масу вантажу, який підлягає видаленню при балансуванні **ЧЕ**.

8. Виведена залежність чутливого елемента акселерометра без зворотного зв'язку та виставкою нульового сигналу **ДК** в вертикальному положенні осі ПП за відсутності закрутки пружного елемента і пружний момент рівний нулю та зміщення Ц.М. маятника (за рахунок зміни маси вантажу балансування) з вертикальної площиною, яка проходить через ось ПП. Розроблено практичне застосування методу балансування чутливого елемента шляхом використання методики лазерного випаровування матеріалу з поверхні вантажу балансування. Практичним методом доведено що для деталей з бронзи лазерне випаровування металу відбувається інакше, ніж у деталей зі сталі. Дослідним шляхом вдалося випарувати за один імпульс (0,03÷ 0,2) мг.

9. В процесі відпрацювання макетного зразку акселерометра були вирішені наступні задачі: були отримані **амплітудно-частотні і фазо-частотні елементи вимірювання**, вирахована відповідна цим частотним характеристикам передавальна функція **ЧЕ**, уточнені параметри контуру стабілізації світло потоку **СД** датчика кута, знижена величина пульсації на виході ЦАП контролера до рівня більше 10мВ, отримана стійка робота акселерометра з урахуванням реальних частотних характеристик, при цьому нестабільність сигналу на вході мостового комутатора ШІМ43 не

Примечание [A12]: ???

Примечание [A13]: ??

Примечание [A14]: ??

Примечание [A15]: перевірити

Примечание [A16]: ??

перевершувала 0,5 (ц.м.р). В результаті макетування і відпрацювання отримано функціонуючий макет АМ06, як базовий зразок приладів експериментальної партії для проведення механічних і кліматичних випробувань, подальшого доведення параметрів акселерометра до необхідних.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Розробка та порядок впровадження вимірювання динамічної похибки стабілізації в стабілізаторах озброєння / О.Безвесільна, В. Галицький, О. Петренко, М. Ільченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2020. – №1/9 (103). – С. 39-45.

Здобувачем отримано

Статті у фахових виданнях:

1. Галицький В.А. Аналіз процесів теплообміну дистанційного вимірювального пристрою механічних величин / В.А. Галицький // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2018. – №2/1 (46) – С. 34-37.

2. Галицький В.А. Метод балансування резонатора вібраційного гіроскопу. Основні технічні вказівки / В.А. Галицький, В.П. Квасніков // Метрологія та прилади. – 2017. – №5-1 (46). – С. 15-17.

3. Методика юстування маятникових вимірювачів лінійного прискорення / В.А. Галицький, Л.В. Кузьмич, В.П. Квасніков // Механіка гіроскопічних систем. – 2019. – №38. – С. 70-78.

4. Галицький В.А. Особливості контролю лінійно-кутових параметрів деталей при вимірюванні на координатно-вимірювальній машині / В.А. Галицький, В.П. Квасніков // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – №1. – С. 187-189.

5. Галицький В.А. Методика балансування чутливого елемента гіроскопу / В.А. Галицький, В.П. Квасніков // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – №2 – С. 174-177.

6. Галицький В.А. Структура завадостійких засобів вимірювання датчиків частоти. Методи обробки сигналів індукційних датчиків / В.А. Галицький, В.П. Квасніков // Вісник Інженерної академії України. – 2018. – №1 – С. 64-69.

7. Галицький В.А. Математическая модель аппаратных систем для измерения угловой скорости / В.А. Галицкий, В.П. Квасников // Вісник Інженерної академії України. – 2019. – №2 – С. 33-36.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1. Галицький В.А. Балансування чутливого елемента гіроскопу / В.А. Галицький // IV Міжнародна наукова технічна конференція пам'яті професора Володимира Поджаренка, 2017 р.: збірник доповідей. – К.: ВКДТС-2017. – С.113-114

2. Галицький В.А. Схематичний опис та принцип роботи

Примечание [A17]: Точно як написано в витязі, по всім публікаціям

оптиковолоконного гіроскопа. / В.А. Галицький В.П. Квасников // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси: XIII Міжнародна науково-практична конф., 16-17 травня 2017 р.: збірник тез. – К.: НАУ, 2017. - Ч.2. – С. 112-117.

3. Галицький В.А. Досягнення високих показників при виготовленні чутливих елементів інерційних навігаційних систем. / В.А. Галицький В.П. Квасников // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси: XIII Міжнародна науково-практична конф., 19-20 травня 2020 р.: збірник тез. – К.: НАУ, 2020.– С. 152-154.

4. Галицький В.А. Статичне балансування чутливого елемента гіроскопу /В.А. Галицький // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах, 2017 р.: збірник доповідей. – К.: ВНТУ, 2017. – С.113-114.

АНОТАЦІЯ

Галицький В.А. - Методи та моделі зменшення динамічних похибок при вимірюванні кутової швидкості рухомих об'єктів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин. – Національний авіаційний університет, Київ, 2021.

Дисертацію присвячено дослідженню та вдосконаленню методів та моделей зменшення динамічних похибок при вимірюванні кутової швидкості рухомих об'єктів. У дисертаційній роботі отримані такі наукові результати: вперше отримана математична модель процесу рівняння вимірювань кутової швидкості гіроскопічних систем стабілізації в блоці керування з урахуванням різних коефіцієнтів перетворення, на основі рівнянь виведені умови автокомпенсації, що зменшує похибку вимірювання кутової швидкості.

Розроблена математична модель амортизатора, яка відрізняється від аналогічних більш пружними характеристиками і дає змогу зменшити вплив дестабілізуючих факторів та дозволяє зменшити вплив ударів та вібрацій.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що на основі отриманих рівнянь для вимірювання кутової швидкості отримано удосконалений метод автоматичного керування сигналом для зменшення впливу похибок, що дає можливість підвищити точність вимірювання кутової швидкості на 8%.

Використанні результати роботи дали змогу покращити параметри виготовлення складових частин, що входять до складу складних вимірювальних та гіроскопічних систем стабілізації в блоці керування.

Вперше було створено методику зменшення впливу температурних похибок, що діють на чутливий елемент під час його роботи.

Виготовлено стенд для метрологічної атестації та перевірки приладів та відтворення реальних навантажень, що виникають у гіростабілізованих

Примечание [A18]: подумать

платформах, що сприяло підвищенню точності вимірювання кутової швидкості в 1.7 разів порівняно з аналогами.

Експериментально показано, що удосконалений метод автоматичного керування сигналом для зменшення впливу похибок дає можливість підвищити точність вимірювання прискорення. На відміну від існуючих аналогів система автоматичного керування є стійкою у великому діапазоні вимірювань приладу.

Ключові слова: датчик кутової швидкості; математична модель; динамічна похибка стабілізації; статичне балансування; режим вимірювання кутової швидкості; інерційні навігаційні системи; маятниковий акселерометр компенсаційного типу, балансування чутливого елемента.

АННОТАЦІЯ

Галицкий В.А. - Методы и модели снижения динамических погрешностей при измерении угловой скорости движущихся объектов. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 - приборы и методы измерения механических величин. – Национальный авиационный университет, Киев, 2021.

Диссертация посвящена изучению и улучшению методов и моделей снижения динамических погрешностей при измерении угловой скорости движущихся объектов. Следующие научные результаты были получены в диссертационной работе: впервые была получена математическая модель процесса измерения угловой скорости гироскопических систем стабилизации в блоке управления с учетом различных коэффициентов конверсии, на основании уравнений выведены условия автокомпенсации, что снижает погрешность измерения угловой скорости.

Разработана математическая модель амортизатора, которая отличается от аналогичных более **эластичных характеристик** и позволяет снизить влияние дестабилизирующих факторов и позволяет уменьшить воздействие ударов и вибраций.

Практическое значение результатов диссертационной работы заключается в том, что на основе полученных уравнений для измерения угловой скорости был получен усовершенствованный метод автоматического управления сигналом для уменьшения воздействия погрешности, что позволяет повысить точность измерения угловой скорости на 8%.

По результатам работы удалось улучшить параметры изготовления компонентов, в составе сложных измерительных и гироскопических систем стабилизации в блоке управления.

Впервые была роздана методология снижения влияния температурной погрешности на чувствительный элемент во время его работы.

Примечание [A19]: подумать

Был создан стенд для метрологической аттестации и тестирования приборов и воспроизведения реальных нагрузок, возникающих на гиросtabilизированных платформах, что способствовало повышению точности измерения угловой скорости в 1,7 раза по сравнению с аналогами.

Экспериментально показано, что усовершенствованный метод автоматического управления сигналом для уменьшения воздействия погрешности позволяет повысить точность измерения ускорения. В отличие от существующих аналогов, автоматическая система управления стабильна в большом диапазоне измерений устройства.

Ключевые слова: угловой датчик скорости; математическая модель; динамическая погрешность стабилизации; статическое балансирование; измерения угловой скорости; инерционные навигационные системы; маятниковый акселерометр компенсационного типа; балансировка чувствительного элемента.

SUMMARY

Halytsky VA Methods and models for reducing dynamic errors when measuring the angular velocity of moving objects. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.11.01 - Devices and methods of measurement of mechanical sizes. National Aviation University, Kyiv, 2021.

The following scientific results were obtained in the dissertation:

For the first time the equations of measurements of angular velocity of gyroscopic stabilization systems in the control unit taking into account various conversion factors were obtained, on the basis of these equations the conditions of autocompensation were deduced that reduces an error of measurement of angular velocity.

The model of the shock-absorber which allows to reduce influence of blows and vibrations was developed. The model differs from similar ones by smaller dimensions but more elastic characteristics and allows to reduce the influence of destabilizing factors. A method for reducing the impact of temperature errors acting on the sensitive element during its operation has been developed.

Models and methods of calculation of elastic characteristics of the elastic shock-absorber are developed.

For the first time a model of compensation of temperature errors of the sensor of moments of the pendulum accelerometer of compensation type was developed, which allowed to provide accuracy of the device when working as a part of difficult gyroscopic platforms.

The practical significance of thesis results are on the basis of the obtained equations for measurements the method of automatic control of a signal for reduction of influence of errors that gives the chance to increase accuracy of measurement of acceleration is negatively improved by 8 %.

Unlike existing analogues, the automatic control system is stable in a wide range of measurements of the device.

A model was built for the first time and experimental studies of the SE balancing technique were carried out using the method of laser evaporation of material.

For the first time, a method was created to reduce the impact of temperature errors acting on the sensitive element during its operation.

A stand was made for metrological certification and inspection of devices and reproduction of real loads arising in gyrostabilized platforms, which helped to determine the accuracy of the speed of 1.7 times compared to analogues.

Experimental studies have shown that due to the introduction of mathematical models and ACS error correction in the control unit was able to achieve a significant reduction in complexity in the manufacture of components.

Key words: angular velocity sensor; mathematical model; dynamic stabilization error; static balancing; angular velocity measurement mode; inertial navigation systems; pendulum accelerometer compensation type, balancing the sensing element.