

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЦІРУК ГАННА ВІКТОРІВНА

УДК 531.383

**КОМПЕНСАЦІЯ ПОХИБОК ТА ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ ПРИ
ВИМІРЮВАННІ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ВІБРАЦІЙНИМ
ДАТЧИКОМ ДИФЕРЕНЦІЙНОГО ТИПУ**

05.11. 01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата технічних наук

Київ-2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
ЧКОВАНІ Валерій Валеріанович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри аерокосмічних систем управління.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
КОРСУН Валерій Іванович,
Національний технічний університет «Дніпровська
політехніка», завідувач кафедри метрології та
інформаційно-вимірювальних технологій;

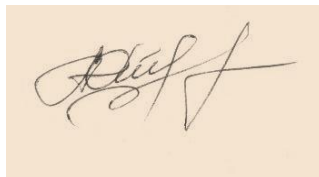
кандидат технічних наук
ЧЕПУК Ларіна Олексіївна,
Житомирський державний технологічний
університет, доцент кафедри метрології та
інформаційно-вимірювальної техніки.

Захист відбудеться « 16 » травня 2019 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К26.062.18 у Національному авіаційному університеті за адресою 03058, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1, ауд.11-311.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою 03058, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий « 15 » квітня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



А. П. Стахова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Вібраційні датчики кутової швидкості мають широких спектр застосувань в сучасному технологічному світі, що стрімко розвивається. Варто зазначити, що таке розповсюдження спричинено здатністю до мініатюризації даного типу датчиків. Вони входять до складу всіх керованих рухомих об'єктів, де, зазвичай, є частиною інерційних систем навігації та управління, грають важливу роль у деяких технологічних процесах при стабілізації рухомих основ кіноапаратури, та ін. Значний вклад у розвиток технології вимірювання кутової швидкості вібраційним датчиком було внесено такими вченими, як Дж. Г. Брайан, Д. Д. Лінч, Е. Дж. Лопер, А. Метьюз, Н. Бабур, В.Ф. Журавльов, Д.М. Клімов, Ю.К. Жбанів, О.В. Збруцький, А.С. Саранулов, М.А. Павловський, В.О. Апостолук, В.В. Чіковані, Ю.А. Яценко та інші. При цьому, як і в будь-якому пристрої, важливо збільшувати точність для досягнення кращих результатів вимірювання.

Застосування датчиків кутової швидкості (ДКШ) на різноманітних об'єктах вимагають від них багато у чому суперечливі вимоги. До них відносяться: стійкість до вібрацій, низька чутливість до лінійного прискорення, стійкість до ударів і, в той же час, невеликий шум при вимірюванні малих кутових швидкостей. Виконання всіх зазначених вимог можливе, шляхом застосування багаторежимної структури з автоматичним перемиканням з одного режиму в інший. Як відомо вібраційний ДКШ може працювати у двох режимах - вимірювання швидкості і вимірювання кута повороту, тобто інтегруючому режимі, та може автоматичним перемиканням з одного режиму на інший забезпечувати точності при різних умовах руху та у відповідності до умов навколишнього середовища. Наприклад, при вимірюванні малих кутових швидкостей доцільно працювати у першому режимі оскільки похибки вимірювання і чутливість в основному визначаються шумом і дрейфом зміщення нуля, який є меншим, від другого режиму, який призначено для вимірювання кута повороту. При вимірюванні більших кутових швидкостей доцільно працювати в другому режимі, оскільки похибки вимірювання в основному визначаються мультиплікативною похибкою, викликаною похибкою масштабного коефіцієнту. Для режиму вимірювання кута повороту масштабний коефіцієнт є константою, що залежить від геометрії резонатора і може досягати 0.01% без застосування температурної корекції.

Тому актуальність роботи полягає у тому, що вперше досліджується третій – диференційний режим роботи вібраційного датчика кутової швидкості (ВДКШ), який має переваги перед двома першими режимами в частині більш високої стійкості до зовнішніх і внутрішніх збурень і може бути вбудований разом з першими двома режимами в один датчик з автоматичним перемиканням з режиму на режим, забезпечуючи значно більшу пристосованість як до будь-якого динамічного об'єкту, так і до умов

навколишнього середовища, зберігаючи високу точність в реальних умовах експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі аерокосмічних систем управління Національного авіаційного університету в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи за темою: №244-ДБ19 «Методологія проектування високоточних стабілізованих платформ для комплексів спеціальної апаратури літальних апаратів з використанням перспективних інерціальних технологій» (номер держреєстрації 0119U100654); а також відповідно до госпрозрахункової науково-дослідної роботи № 796-Х13 «Розробка методик корекції та паспортизації параметрів коріолісового вібраційного гіроскопа та дослідження режимів його роботи»; держбюджетної кафедральної науково-дослідної роботи №95/22.01.08 «Розробка та впровадження методології дослідницького підходу при викладанні курсів, за профілем кафедри»; держбюджетної кафедральної науково-дослідної роботи №15/22.01.08 «Розробка методології проектування робастних систем стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв визначення орієнтації рухомих об'єктів».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування та розробка алгоритмів компенсації внутрішніх похибок та зовнішніх збурень у вібраційному ДКШ диференційного типу, а також обробка і удосконалення системи управління стоячою хвилею так, щоб вона дозволяла автоматично перемикатися з диференційного режиму роботи на відповідні режими датчика кутової швидкості і датчика кута (інтегруючого режиму).

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробити математичну модель вимірювань диференційного ВДКШ з урахуванням різних коефіцієнтів перетворення деформацій в напругу, що знімаються з електродів.

2. Визначити умови компенсації перехресного демпфування для диференційного ВДКШ.

3. Розробити алгоритм початкового визначення зміщення нуля шляхом вимірювання її компонентів, використовуючи примусові повороти вібраційної хвилі на фіксовані кути.

4. Розробити нелінійну модель ВДКШ чутливого елемента та системи управління і обробки інформації та зв'язати їх у єдину систему, що дозволяє автоматично переключати три режими роботи .

5. Визначити ступінь компенсації ударних збурень в диференційному ВДКШ шляхом моделювання.

6. Розробити нечіткий контролер для каналу управління кутом стоячої хвилі і порівняти якість його роботи зі стандартними ПІ та ПІД контролерами.

7. Реалізувати, з використанням розробленої моделі, у якості прикладу, три режими роботи ВДКШ при вимірюванні постійної кутової швидкості.

8. Реалізувати диференційний ВДКШ та провести експериментальні дослідження для визначення ступеня компенсації: ударних збурень, вібраційних збурень і внутрішніх шумів, звукових імпульсів на резонансній частоті і звукових шумів, зовнішніх постійних та змінних магнітних полів.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання кутової швидкості в вібраційному ДКШ диференційного типу в умовах його експлуатації.

Предметом дослідження є методи компенсації похибок, що виникають при дії внутрішніх і зовнішніх впливів на вібраційний датчик кутової швидкості.

Методи досліджень. Розробку нелінійної математичної моделі вібраційного ДКШ диференційного типу виконано на основі методів синтезу та аналізу систем управління; при синтезі алгоритму адаптивного фільтру Калмана для оцінки кутової швидкості і змінної кореляційної функції використано стохастичні методи математичної статистики та теорії оцінювання (розділ 2); вивід рівнянь вимірювання диференційного ДКШ виконано на основі використання методів теорії рішень диференційних рівнянь; були використані методи теорії інтелектуальних систем; формування моделі і моделювання режимів роботи ВДКШ виконувалося у системі Matlab-Simulink (розділ 3); на основі критеріїв розроблених у теорії автоматичного управління виконувалося настроювання параметрів моделі та обробка даних вимірювань при експериментальних дослідженнях (розділ 4).

Наукова новизна отриманих результатів.

У роботі отримані такі нові наукові результати:

1. Вперше виведені рівняння вимірювань кутової швидкості вібраційним датчиком диференційного типу з урахуванням коефіцієнтів перетворення деформації в напругу, що знімаються з електродів і на основі цих рівнянь виведені умови компенсації перехресного демпфування резонатора вібраційного датчика, що зменшує похибку вимірювання кутової швидкості.

2. Розроблено алгоритм початкового визначення зміщення нуля вібраційним датчиком диференційного типу, використовуючи примусові повороти вібраційної хвилі на фіксовані кути.

3. Розроблений алгоритм, що використовує інформаційну надмірність для зменшення похибок вимірювання кутової швидкості та проведено порівняння різних алгоритмів, включаючи адаптивний фільтр Калмана, з точки зору величин систематичних і випадкових похибок.

4. Вперше розроблена нелінійна модель вібраційного датчика кутової швидкості диференційного типу, яка складається з моделі чутливого елемента та системи управління і обробки інформації. Відповідно, розроблені компоненти було зв'язано у єдину вимірювальну систему так, щоб вона дозволяла автоматично переключати три режими роботи датчика.

Моделюванням програмованої в середовищі Matlab-Simulink моделі було показано її дієвість.

5. Вперше експериментальними дослідженнями зразка вібраційного датчика кутової швидкості диференційного типу чисельно визначені ступені компенсації внутрішніх шумів і наступних зовнішніх збурень: ударних збурень, вібраційних збурень, звукових імпульсів на резонансній частоті і звукових шумів, що охоплюють резонансну частоту, а також постійних та змінних магнітних полів.

Практичне значення одержаних результатів:

- на основі отриманих рівнянь для вимірювань диференційного ВДКШ отримані умови, при яких компенсується похибка, що обумовлена перехресним демпфуванням;

- виведені умови, коли масштабні коефіцієнти двох вимірювальних каналів є рівними між собою, що веде до збільшення ступені компенсації зовнішніх збурень;

- розроблена методика виставлення кута хвилі θ^* , яка вирівнює масштабні коефіцієнти двох вимірювальних каналів диференційного ВДКШ і компенсує похибку від перехресного демпфування.

- виведена умова початкової компенсації зміщення нуля диференційного ВДКШ та надано рекомендації щодо виставлення кута хвилі таким, що компенсує зміщення нуля;

- розроблена процедура визначення зміщення нуля диференційного ВДКШ, що заснована на переорієнтації стоячої хвилі, яку рекомендується проводити кожний раз після включення датчика, забезпечуючи повторюваність зміщення нуля на рівні 0.033 град/год незалежно від орієнтації осі чутливості ВДКШ відносно вектору кутової швидкості обертання Землі;

- розроблений алгоритм поточної компенсації зміщення нуля, шляхом модуляції різниці фаз сигналів двох вимірювальних каналів X і Y , при періоді модуляції різниці фаз значно меншому від часу кореляції зміни зміщення нуля від температури. Розроблена блок схема системи управління диференційного ВДКШ, що забезпечує вказану модуляцію;

- представлені результати вимірювання температурної залежності кута хвилі θ^* для дослідного зразка диференційного ВДКШ. Експериментально показано, що цей кут дуже слабо залежить від температури, при температурному коефіцієнті на рівні $3 \times 10^{-4} \text{ \%}/^\circ\text{C}$;

- вперше побудована нелінійна модель ВДКШ, яка дає можливість досліджувати вплив різних зовнішніх діючих факторів на вихідний сигнал ВДКШ і оцінювати його точність. Показано, що розроблена модель дає можливість задавати внутрішні динамічні параметри ВДКШ, такі як: добротність, резонансну частоту, різнодобротність, різночастотність і їх зміни в часі, а також напрямком головних осей жорсткості та демпфування. Розроблена модель реалізує усі три режими роботи ВДКШ;

– виведена залежність між електричною напругою на виході ВДКШ і величиною вхідного удару від параметрів п'єзоелектродів для двох конструкцій металевого резонатора, що дозволяє дослідити вплив удару на вихідний сигнал диференційного ВДКШ;

– вперше була побудована комп'ютерна Simulink модель трирежимного ВДКШ з автоматичним перемиканням з режиму на режим. Трирежимний ВДКШ може забезпечити високу гнучкість при виконанні суперечливих вимог багатьох важливих застосувань, наприклад, широкий частотний і динамічний діапазони при вимірюванні великих кутових швидкостей і одночасно малі шуми при вимірюванні малих кутових швидкостей;

– було показано, що диференційний режим роботи має більший, ніж режим ДКШ коефіцієнт придушення зовнішніх збурень та меншу чутливість до таких збурень, як: удари, вібрації, акустичні імпульси, магнітні поля.

– зміщення нуля диференційного ВДКШ протягом синусоїдальної вібрації в частотному діапазоні до 300 Гц є меншим ніж у ВДКШ, що працює у режимі ДКШ приблизно в 10 разів. Було виявлено, що зміщення нуля до вібраційного прискорення, також залежить від частоти синусоїдальної вібрації. Ця залежність близька до лінійної;

– експериментальні дослідження показали, що шум диференційного ВДКШ менший від шуму ВДКШ, працюючого у режимі ДКШ при наявності зовнішніх вібрацій. Було експериментально показано, що складові компоненти більш високої частоти, такі як білий шум та випадкове блукання, майже не залежать від амплітуди синусоїдальної вібрації при менших шумових компонентах для диференційного каналу;

– експериментально показано, що акустичні імпульси близькі до резонансної частоти придушуються диференційним ВДКШ у 65 (36 дБ) та 76 (37.6 дБ) рази. Дані коефіцієнти придушення є більшими, ніж аналогічні показники, які можна досягти при використанні сучасних звукоізоляційних матеріалів;

– коефіцієнти придушення магнітного поля вздовж та перпендикулярно осі чутливості (ОЧ) диференційного ВДКШ дорівнюють 10 та 25, відповідно.

Впровадження результатів роботи. Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено на підприємстві ПАТ «НВО «Київський завод автоматики» та у навчальний процес Національного авіаційного університету при викладанні дисципліни «Основи технологій виготовлення пристроїв бортових систем управління», що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані автором самостійно.

В спільних роботах автору належить наступне: у роботах [1, 4, 6, 13] виконано аналіз літературних даних за темою досліджень, проведено моделювання в середовищі Matlab-Simulink, в роботі [2] розроблено алгоритм визначення і корекції зміщення нуля шляхом кутового переорієнтування

вібраційної хвилі при кожному включенні датчика, в роботах [3, 5, 16] проведено підготовка експериментальної бази, організація планування та проведення експериментів та обробка їх результатів, в роботі [7, 18] проведено алгоритмічну, розрахункову частину та аналіз результатів моделювання, в роботі [8] виконано розробку моделей компонентів вібраційного ДКШ диференційного типу та формування нелінійної моделі у Matlab-Simulink, яка сполучає різні елементи ДКШ, в роботі [17] розроблена методика настроювання моделі і проведені розрахунки для підтвердження методики, в роботах [12, 14] проведено обробка результатів вимірювання, в роботі [19] обґрунтовано доцільність використання методики балансування.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались та обговорювались на таких конференціях: the sixth world congress «Aviation in the XXI-st century» Safety in Aviation and Space Technologies (Kyiv, Ukraine, 2016); IEEE Proc. Intern. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) (Kyiv, Ukraine, 2014); XIV міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки» (Київ, Україна, 2014); the seventh world congress “Aviation in the XXI-st century” Safety in Aviation and Space Technologies (Kyiv, Ukraine, 2016); IEEE Proc. Intern. Conf. on Actual Problem of Unmanned Aerial vehicles Development (APUAVD) (Kyiv, Ukraine, 2015); Proc. 2016 IEEE 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (Kyiv, Ukraine, 2016); 4-th Int. IEEE Conf. Proceedings on “Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development” (APUAVD) (Kyiv, Ukraine, 2017); IEEE Proc. Intern. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (Kyiv, Ukraine, 2018); Всеукраїнська науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, Україна, 2018).

Також результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри аерокосмічних систем управління Національного авіаційного університету.

Публікації. За матеріалами дисертації надруковано 19 публікацій: 8 з яких в виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 9 тез доповідей, 2 патенти України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить вступ, огляд стану проблеми і постановку задачі досліджень, 4 розділи, загальні висновки по роботі, список використаних джерел із 107 найменувань. Дисертаційна робота викладена на 188 сторінках, основний зміст роботи становить 151 сторінка друкованого тексту, в тому числі 99 рисунків, 9 таблиць та 3 додатки.

ОСНОВНОЇ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дослідження, сформульовано мету і завдання досліджень, наведені дані про наукову новизну, практичну цінність і впровадження отриманих результатів. Представлені 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** виконано огляд ВДШК, включно з датчиками, що виготовлені на основі технології мікроелектромеханічних систем (МЕМС). Всі ДКШ, включаючи вібраційні датчики кутової швидкості, можна розділити на дві основні категорії залежно від того, чи вимірюється кутова швидкість чи кут повороту. Однак, відмінною рисою ВДКШ є те, що вимірювання кутової швидкості та кута повороту можна реалізувати в одному ДКШ у вигляді двох режимів вимірювання: режим датчика кутової швидкості та режим датчика кута, який також називають інтегруючим режимом, з автоматичним перемиканням з режиму на режим.

Проведено аналіз світових тенденцій розвитку як макро- так і мікро-вібраційних ДКШ. Встановлено, що первинні перетворювачі механічних величин, зокрема кутової швидкості, що побудовані на основі МЕМС, розвиваються швидкими темпами і показники їх тотожні рівню деяких типів вібраційних макродатчиків кутової швидкості. Однак, ВДКШ, що побудовані на основі кварцових напівсферичних резонаторів високої добротності ($\sim 10^7$) на сьогодні мають значну перевагу у точності. Показано, що ВДКШ побудовані на основі металевих циліндричних резонаторів з добротністю в межах від $3 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^4$, що мають велику віброуючу масу (у 30-50 разів більшу ніж у кварцового) і над низький температурний коефіцієнт частоти (у 10 разів менше, ніж у кварца) можуть мати цілком конкуруючі точності.

Розглянуто та проаналізовано три режими роботи ВДКШ. Представлені блок схеми систем управління стоячою хвилею для кожного режиму. Представлені графіки некомпенсованої і компенсованої квадратурних похибок, інтегруючого та диференційного режимів ДКШ. Обґрунтовано потребу у використанні режиму ДКШ при вимірюванні малих кутових швидкостей, та інтегруючого режиму для великих кутових швидкостей і таких, що швидко змінюються.

Визначені основні похибки ВДКШ зумовлені недосконалістю виготовлення резонатора. Графічно представлені похибки інтегруючого режиму роботи ВДКШ, що обумовлені різними жорсткістю та добротністю резонатора.

Другий розділ присвячений компенсації внутрішніх похибок вібраційного ДКШ, працюючого в диференційному режимі.

На основі диференційних рівнянь для двовимірного маятника вперше виводяться рівняння вимірювань диференційного режиму вібраційного

датчика з урахуванням різних коефіцієнтів перетворення механічної деформації в електричну напругу.

Отримані рівняння вимірювань по каналах X та Y , які після компенсації квадратурної похибки мають вигляд:

$$\begin{aligned} z_x &= -2k\Omega D_y \sin 2\theta + D_x d_{xx} \cos 2\theta + d_{xy} D_y \sin 2\theta \\ z_y &= 2k\Omega D_x \cos 2\theta + D_y d_{yy} \sin 2\theta + d_{xy} D_x \cos 2\theta, \end{aligned} \quad (1)$$

де k є коефіцієнт Брайана, d_{xx} , d_{yy} є коефіцієнти демпфування коливань резонатора по осям X і Y , відповідно; $d_{yx} = d_{xy}$ є перехресним демпфуванням; D_x і D_y є коефіцієнтами перетворення механічних коливань в електричні, по вимірювальним осям X і Y , відповідно; θ є фіксований кут стоячої хвилі відносно електроду збудження коливань резонатору.

Встановлено, що вібраційний датчик кутової швидкості диференційного типу має два масштабних коефіцієнта MK_x - по каналу X і MK_y - по каналу Y та, які представлено у вигляді:

$$\begin{aligned} MK_x &= 2kD_y \sin 2\theta; \\ MK_y &= 2kD_x \cos 2\theta. \end{aligned} \quad (2)$$

Показано, що диференційний ВДКШ має два зміщення нуля: B_x - по каналу X і B_y - по каналу Y та розраховуються наступним чином:

$$\begin{aligned} B_x &= D_x d_{xx} \cos 2\theta + d_{xy} D_y \sin 2\theta; \\ B_y &= D_y d_{yy} \sin 2\theta + d_{xy} D_x \cos 2\theta. \end{aligned} \quad (3)$$

На основі виразів (2) і (3) встановлено, що МК і зміщення нуля двох каналів диференційного ВДКШ залежить від орієнтації θ стоячої хвилі.

Розроблена методика виставлення кута хвилі θ^* , яка вирівнює масштабні коефіцієнти двох вимірювальних каналів диференційного ВДКШ і компенсує похибку від перехресного демпфування.

Отримані аналітичні вирази для масштабного коефіцієнту та зміщення нуля диференційного ВДКШ, коли кут хвилі є θ^* . Представлені результати вимірювання температурної залежності кута хвилі θ^* для дослідного зразка диференційного ВДКШ.

Встановлена умова початкової компенсації зміщення нуля диференційного ВДКШ та надано рекомендації щодо виставлення кута хвилі, що компенсує зміщення нуля.

Розроблена процедура визначення зміщення нуля диференційного ВДКШ, що заснована на переорієнтації стоячої хвилі, яку запропоновано проводити кожного разу після включення ДКШ, забезпечуючи при цьому повторюваність зміщення нуля при всіх включеннях на рівні 0.033 град/г незалежно від орієнтації осі чутливості ВДКШ відносно вектору кутової швидкості обертання Землі.

Запропоновано використання адаптованого фільтру Калмана в диференційному ВДКШ, що визначає міжканальну кореляційну матрицю в онлайн режимі та в такий спосіб зменшує похибки вимірювань на підставі урахування змін міжканального коефіцієнта кореляції у часі.

Третій розділ присвячено побудові нелінійної моделі вібраційного ДКШ і аналізу результатів моделювання. Розглядається сумісна модель чутливого елемента, як сукупність резонатора та електродів, що перетворюють механічні зусилля в електричну напругу і навпаки, та програмно-алгоритмічну частину, яка обробляє інформацію чутливого елемента (ЧЕ) і подає сигнали керування на нього. Показано, що нелінійна система, що складається з чутливого елемента та програмно-алгоритмічного забезпечення імітує роботу реального ДКШ за рахунок використання нелінійних блоків обробки інформації ЧЕ, таких як: генератор керований напругою, модуляція і демодуляція.

Розглянутий у даному розділі алгоритм може керувати положенням стоячої хвилі у вібраційних конструкціях, в тому числі і в мікроелектромеханічних датчиках кутової швидкості та є основою при створенні диференційного режиму. Використання диференційного алгоритму, що може ефективно придушувати зовнішні збурення коли стояча хвиля встановлена під кутом θ^* дає підстави відокремити його в окремий режим. В результаті, усі три режими роботи можуть бути об'єднані в одному вібраційному ДКШ, для реалізації трирежимного пристрою ДКШ. Модель і алгоритм трирежимного вібраційного ДКШ з автоматичним переключенням з режиму на режим була синтезована вперше.

На рис. 1 представлена нелінійна Simulink модель ВДКШ з блоком вхідної кутової швидкості, резонатором, коефіцієнтами перетворення G_x, G_y, D_x, D_y механічних коливань в електричні і навпаки, по вимірювальним каналам X і Y , відповідно, і блоками обробки інформації та формування сигналів управління на чутливий елемент.

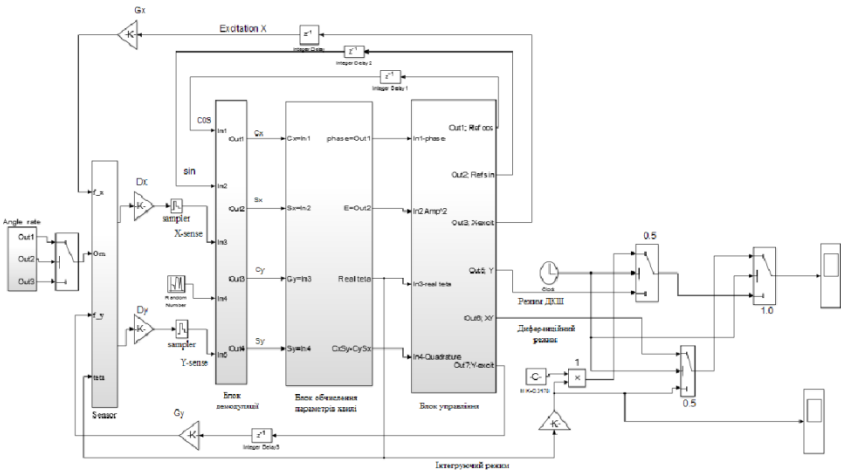


Рис.1. Нелінійна Simulink модель ВДКШ, що реалізує три режими його роботи

У правій частині рис.1 представлено формування вихідних сигналів ВДКШ для трьох режимів його роботи - режиму ДКШ, інтегруючого режиму і диференційного режиму.

Алгоритм обробки інформації чутливого елементу і формування сигналів управління складається з «блоку демодуляторів», які формують демодульовані сигнали C_x, C_y, S_x, S_y , на основі яких розраховуються параметри двовимірного маятника a, q, ω_r і θ . Цей блок позначений на рис.1, як «Блок обчислення параметрів хвилі». У наступному блоці, що позначений, як «Блок управління», формуються сигнали управління і вихідні сигнали про кутову швидкість або кут повороту в залежності від режиму роботи ВДКШ.

Проведено детальний опис блоків, що представлені на рис.1, а також критерії їх налаштування для коректної роботи системи.

На рис.2 представлено три режими роботи ВДКШ з автоматичним перемиканням з одного режиму на інший при вимірюванні постійної кутової швидкості 100 град/с.

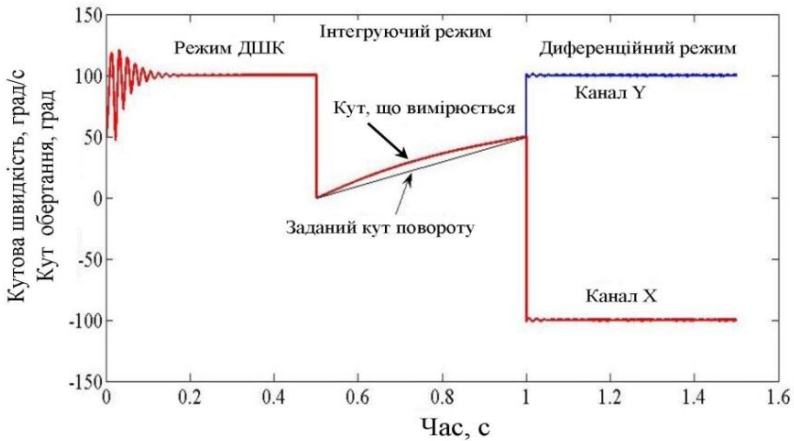


Рис.2. Вихідні сигнал трирежимного ВДКШ

На основі розробленої моделі отримана залежність зміщення нуля ВДКШ від кута орієнтації стоячої хвилі та розроблено методику компенсації зміщення нуля ВДКШ шляхом повороту стоячої хвилі.

Четвертий розділ дисертації присвячено експериментальним дослідженням диференційного ДКШ.

Тестування проводилося з експериментальним зразком ВДКШ, компоненти якого представлені на рис.3. Вібраційний датчик кутової швидкості має просту конструкцію, адже найважливіший його компонент – чутливий елемент включає в себе три складові, а саме: основа, резонатор і кожух.



Рис.3. Компоненти ВДКШ, що тестується

В цьому розділі представлено результати досліджень, що демонструють властивості диференційного режиму роботи у порівнянні з режимом ДКШ по придушенню наступних зовнішніх збурень: механічних ударів, вібрації, акустичних імпульсів з частотою близькою до резонансної частоти, а також при дії незмінних і змінних магнітних полів.

Таблиця 1

Обробка результатів ударних випробувань

	Амплітуда 20 g, тривалість 2 мс		Амплітуда 100 g, тривалість 2 мс	
	Вздовж ОЧ	Перпенд. ОЧ	Вздовж ОЧ	Перпенд. ОЧ
Коефіцієнт придушення ударів по піковому значенню, R_p	2	2	Насичення	3
Коефіцієнт придушення ударів по похибці кута R_a ; макс. похибка (кут. хв.)	5 2	6 2	5 5	2.5 18
Коефіцієнт придушення ударів по зміні зміщ. нуля R_b ; макс. зміщ. нуля (град/с)	3 0.06	8 0.03	3.4 0.12	4 0.07
Коефіцієнт чутливості диференц. ВДКШ до ударного прискорення град/с/g	$4.8 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$3.3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$

З таблиці 1 видно, що диференційний режим придушує ударні навантаження, щонайменше у два рази краще від перших двох режимів. Встановлено, що максимальний коефіцієнт придушення ударів дорівнює 8, а мінімальний дорівнює 2.

Поведінка компонент шуму протягом, як повздовжніх, так і бічних вібрацій знаходиться у тотожних діапазонах вібраційних параметрів.

Чутливість зміщення нуля до вібраційного прискорення вздовж та перпендикулярно осі чутливості ВДКШ

Частота вібрації, Гц		Чутлив. зміщення нуля диференційного каналу град/с/g	Чутлив. зміщення нуля каналу X град/с/g	Чутлив. зміщення нуля каналу Y град/с/g
50	Вздовж ОЧ	$9.2 * 10^{-3}$	$2.4 * 10^{-4}$	$9 * 10^{-5}$
	Перпенд. ОЧ	$8.5 * 10^{-5}$	$3.75 * 10^{-4}$	$2.95 * 10^{-4}$
100	Вздовж ОЧ	$1.16 * 10^{-4}$	$4.35 * 10^{-4}$	$5.4 * 10^{-4}$
	Перпенд. ОЧ	$5.4 * 10^{-4}$	$1.75 * 10^{-3}$	$9.3 * 10^{-4}$
300	Вздовж ОЧ	$6.7 * 10^{-5}$	$2.9 * 10^{-4}$	10^{-4}
	Перпенд. ОЧ	$5.25 * 10^{-4}$	$2.04 * 10^{-3}$	$7.1 * 10^{-4}$
Середнє	Вздовж ОЧ	$9.2 * 10^{-5}$	$3.2 * 10^{-4}$	$2.4 * 10^{-4}$
	Перпенд. ОЧ	$3.8 * 10^{-4}$	$1.4 * 10^{-3}$	$6.5 * 10^{-4}$

Результати випробувань диференційного ВДКШ на вібростійкість стосовно чутливості зміщення нуля від лінійної синусоїдальної вібрації у діапазоні частот до 300 Гц і діапазоні амплітуд до 3g показують, що середня чутливість диференційного ВДКШ є $9.2 * 10^{-5}$ град/с/g для вібраційного прискорення вздовж осі чутливості приладу, що майже у 2.5 разів менше, ніж для режиму датчика кутової швидкості, і $3.8 * 10^{-4}$ град/с/g для вібраційного прискорення перпендикулярно осі чутливості приладу, що у 1.7 разів менше, ніж для режиму датчика кутової швидкості.

Чутливість зміщення нуля диференційного ВДКШ до постійного магнітного поля, що показаний на рис.4, є $1.7 * 10^{-4}$ град/с/g/(мТл), що майже у 25 разів менше, ніж для режиму датчика кутової швидкості.

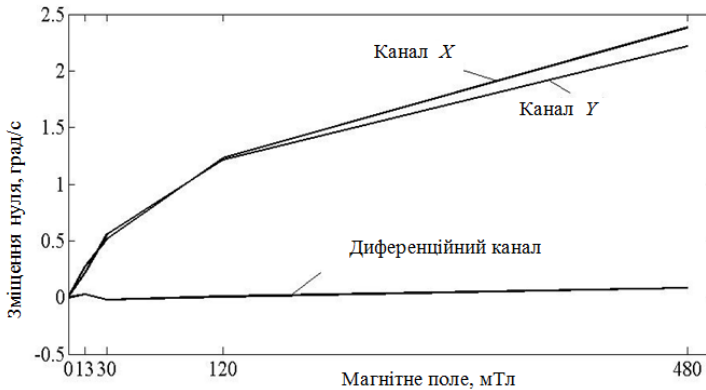


Рис.4. Чутливість каналів диференційного КВГ до магнітного поля прикладеного перпендикулярно ОЧ

Чутливість зміщення нуля диференційного ВДКШ до змінного магнітного поля амплітудою 10 мТл, була нижче шумів датчика. На рис.5 показані результати випробувань на вплив звукових імпульсів, частота яких є близькою до резонансної.

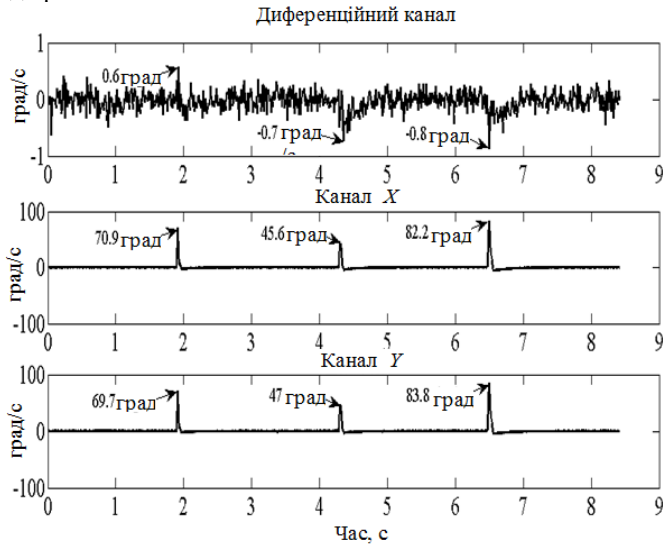


Рис.5. Відклик диференційного КВГ на 3 звукових імпульси на частоті близької до резонансної частоти

Мінімальний коефіцієнт придушення звукових імпульсів на резонансної частоті для диференційного ВДКШ є у 65 разів (36 дБ) менше, ніж для режиму датчика кутової швидкості (канали X та Y), тобто забезпечує придушення звукових збурень ліпше, ніж більшість сучасних звукоізоляційних матеріалів.

ВИСНОВКИ ТА ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Розглянуто та проаналізовано три режими роботи ВДКШ. Обґрунтовано, що при вимірюванні малих кутових швидкостей треба використовувати режим ДКШ або диференційний режим, а інтегруючий режим треба використовувати при вимірах великих і таких, що швидко змінюються.

2. Виведені аналітичні вирази для зміщення нуля і масштабних коефіцієнтів кожного з двох вимірювальних каналів диференційного ВДКШ. Показано, що вони мають періодичну залежність від кута хвилі θ . Отримані умови, при яких компенсується похибка, що обумовлена перехресним демпфуванням.

3. Розроблена методика виставлення кута хвилі θ^* , яка вирівнює масштабні коефіцієнти двох вимірювальних каналів диференційного ВДКШ і компенсує похибку від перехресного демпфування.

4. Отримані аналітичні вирази для масштабного коефіцієнту та зміщення нуля диференційного ВДКШ, коли кут хвилі є θ^* і показано, що цей масштабний коефіцієнт, на відміну від ВДКШ, не залежить від амплітуди і частоти резонансних коливань.

5. Розроблена процедура визначення зміщення нуля диференційного ВДКШ, що заснована на переорієнтації стоячої хвилі, яку рекомендується проводити кожний раз після включення приладу, забезпечуючи повторюваність зміщення нуля від включення до включення на рівні 0.033 град/г незалежно від орієнтації осі чутливості ВДКШ відносно вектору кутової швидкості обертання Землі.

6. Запропоновано адаптований фільтр Калмана для використання в диференційному ВДКШ, що обчислює міжканальну кореляційну матрицю в онлайн режимі, що поліпшує перерегулювання при раптовій зміні кутової швидкості.

7. Вперше побудована нелінійна модель ВДКШ, яка дає можливість досліджувати вплив різних зовнішніх діючих факторів на вихідний сигнал ВДКШ і оцінювати його точність. Показано, що розроблена модель дає можливість задавати внутрішні динамічні параметри ВДКШ, такі як добротність, резонансну частоту, різнодобротність, різночастотність і їх зміни в часі, а також напрямки головних осей жорсткості та демпфування. Розроблена модель реалізує усі три режими роботи ВДКШ.

8. Диференційний режим роботи має більший, ніж режим ДКШ коефіцієнт придушення зовнішніх збурень та значно меншу чутливість до таких збурень як: удари, вібрації, акустичні імпульси, магнітні поля.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ПО ТЕМЕ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

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

1. Chikovani V. V. Vibratory gyro accuracy parameters improving by means of excitation control / V. V. Chikovani, G. V. Tsuruk. // *Electronics and control systems*. – NAU, Kyiv, Ukraine, 2013. – №3(37). - PP. 43-48. Індексация *Crossref, Index Copernicus, Vernadsky National Library of Ukraine, EBSCOhost (Electronics & Control Systems), Simple Search Metadata (SSM), Google Scholar, РИИЦ*. Здобувачем проведено математичне моделювання параметрів датчика в середовищі *Simulink*, та проведено розрахункову частину дослідження.

2. Chikovani V. V. Bias compensation in differential Coriolis vibratory gyro / V. V. Chikovani, G. V. Tsuruk. // *Electronics and control systems*. – 2013. – №4(38). - PP. 99-103. Індексация *Crossref, Index Copernicus, Vernadsky National Library of Ukraine, EBSCOhost (Electronics & Control Systems), Simple Search Metadata (SSM), Google Scholar, РИИЦ*. Здобувачем проведено розробку алгоритму визначення і корекції зміщення нуля шляхом кутового переорієнтування вібраційної хвилі при кожному включенні датчика.

3. Chikovani V. V. Shock resistance of differential type ring-like resonator vibratory gyroscope / V. V. Chikovani, H. V. Tsuruk. // *Electronics and control systems*. – 2014. – №4(42). – PP. 79-83. Індексція *Crossref, Index Copernicus, Vernadsky National Library of Ukraine, EBSCOhost (Electronics & Control Systems), Simple Search Metadata (SSM), Google Scholar, ПИІЦ*. Здобувачем здійснено експериментальні дослідження.

4. Chikovani V. V. Redundant information processing techniques comparison for differential vibratory gyroscope / V. V. Chikovani, O. A. Suschenko, H. V. Tsuruk. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – №4/7(82). – PP. 45-52. Індексція *Scopus, Crossref, Academic search complete, Chemical abstracts plus, Index Copernicus, RINC, Google scholar, OAJI, OpenAIRE, Polska Bibliografia Naukowa, ResearchBib - Academic Resource Index, Scientific Indexing Services (SIS), WorldCat, Vernadsky National Library of Ukraine*. Здобувачем проведено моделювання датчиків різного принципу роботи.

5. Chikovani V. V. Effective rejection of acoustic and magnetic field's disturbances by single-mass differential vibratory gyroscope / V. V. Chikovani, H. V. Tsuruk. // *Військово-Технічний Збірник*. – Національна академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного, Львів, 2017. – №16. – СС. 31-37. Індексція *Crossref, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), CiteFactor, Google scholar, Polska Bibliografia Naukowa (PBN), ResearchBib – Academic Resource Index, WorldCat, Vernadsky National Library of Ukraine*. Здобувачем проведено організацію та проведення експериментальних досліджень, а також аналіз та опис результатів.

6. Chikovani V. V. Triple-mode vibratory gyroscope / V. V. Chikovani, H. V. Tsuruk, O. Korolova. // *Військово-Технічний Збірник*, Національна академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного. – Львів, 2018. – №18. – СС. 18-25. Індексція *Crossref, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), CiteFactor, Google scholar, Polska Bibliografia Naukowa (PBN), ResearchBib – Academic Resource Index, WorldCat, Vernadsky National Library of Ukraine*. Здобувачем проведено моделювання в середовищі *Simulink*.

Статті у фахових виданнях:

7. Chikovani V. V. Digital rate MEMS vibratory gyroscope modeling, tuning and simulation results / V. V. Chikovani, H. V. Tsuruk. // *An International Journal of Computing Science and Applications (Computación y Sistemas)*. – 2017. – №21(1). – PP. 147-159. Індексція *Scopus, Web of Science (core collection-emerging sources), CONACYT Index of Excellence of Mexican Journals, Redalyc, E-Journal, REDIB, Latindex, Biblat, Periodica, DBLP, and SciELO (part of Web of Science)*. Здобувачем проведено розрахункову частину та опис результатів моделювання.

8. Chikovani V. V. External disturbances rejection by differential single-mass vibratory gyroscope / V. V. Chikovani, O. A. Sushchenko, H. V. Tsuruk. // *Acta Polytechnica Hungarica*. – 2017. – №14(3). – PP. 251-270. Індексція

Scopus, Web of Science, E-Journal, REDIB, Latindex, Biblat, Periodica, DBLP. Здобувачем виконано розробку методики настроювання моделі.

Патенти України на винахід:

9. Пат. на винахід 128752 Україна, МПК G 01 С 25/00. Спосіб виставки двокоординатного датчика кута малагабаритного гіроскопа / Безвесільна О. М., Мірошник С. В., Маляров С. П., Петренко О. В., Цірук В. Г., Цірук Г. В.; заявник та власник ПАТ «НВО «Київський завод автоматики». – №u201802730; заявл. 12.05.14; опубл. 10.10.18, Бюл. №19. *Здобувачем запропоновано застосувати електричне аретування для отримання мінімальної вихідної напруги датчиків кута.*

10. Пат. на винахід 127341 Україна, МПК H02K 3/00. Електричний двигун постійного струму / Безвесільна О. М., Мірошник С. В., Маляров С. П., Петренко О. В., Цірук В. Г., Цірук Г. В.; заявник та власник ПАТ «НВО «Київський завод автоматики». – №u201802152; заявл. 02.03.18; опубл. 25.07.18, Бюл. №14. *Здобувачем запропоновано збільшити число активних провідників при збереженні кількості паралельних гілок обмотки.*

Опубліковані праці апробаційного характеру:

11. Tsiruk H.V. Bias compensation in vibratory gyroscope / H.V. Tsiruk // XIV міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки». – 2-3 квітня, Національний авіаційний університет, Київ, 2014. – С.171.

12. Chikovani V. V. Precise vibratory gyroscope based on resonator made of elinvar alloy / V. V. Chikovani, O. V. Petrenko, H. V. Tsiruk. // The sixth world congress “Aviation in the XXI-st century” Safety in Aviation and Space Technologies. – 23-25 Sept., NAU, Kyiv, Ukraine, 2014. – С. 3.5.34–3.5.38. *Здобувачем проведено аналіз і опис результатів дослідження.*

13. Chikovani V. V. Differential CVG shock damping capacity. computer simulation results / V. V. Chikovani, H. V. Tsiruk. // IEEE Proc. Intern. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). – 14-17 Oct., NAU, Kyiv, Ukraine, 2014. - PP. 132-134. *Здобувачем проведено моделювання в середовищі Simulink.*

14. Chikovani V. V. Differential mode of operation for multimode vibratory gyroscope / V. V. Chikovani, H. V. Tsiruk. // IEEE Proc. Intern. Conf. on Actual Problem of Unmanned Aerial vehicles Development (APUAVD). – 13-15 Oct., NAU, Kyiv, Ukraine, 2015. - PP. 87-90. *Здобувачем проведено розрахункову частину дослідження та аналіз результатів розрахунків.*

15. Tsiruk H.V. Damper for vibratory gyroscope that is used in rigid conditions with mechanical impact / H. V. Tsiruk, A. V. Petrenko// The seventh world congress “Aviation in the XXI-st century” Safety in Aviation and Space Technologies. – 19-21 Sept., NAU, Kyiv, Ukraine, 2016. – С. 3.3.51–3.3.55. *Здобувачем проведено аналіз, опис і обґрунтування структури датчика в заданих умовах експлуатації.*

16. Chikovani V. V. Influence of external acoustic disturbances on differential vibratory gyroscope output signals / V. V. Chikovani, H. V. Tsiruk, A.

N. Beregovoy. // Proc. 2016 IEEE 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control. – 18-20 Oct., Kyiv, Ukraine, 2016. - PP. 95-97. *Здобувачем проведено організацію і проведення експерименту.*

17. Chikovani V. V. Vibratory gyroscope response parameters improving by the use of smooth noise differentiator in the rate controller / V. V. Chikovani, H. V. Tsiрук. // 4-th Int. IEEE Conf. Proceedings on “Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development” (APUAVD). – 17-19 Oct., Kyiv, Ukraine, 2017. - PP. 237-240. *Здобувачем проведено комп'ютерне моделювання.*

18. Chikovani V. V. Application of hybrid fuzzy logic controller to keep a standing wave angular position in MEMS rate gyroscope / V. V. Chikovani, O. A. Suschenko, H. V. Tsiрук. // IEEE Proc. Intern. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 24-26 Apr., NTUU KPI, Kyiv, Ukraine, 2018. - PP. 558-562. *Здобувачем виконано розрахункову частину дослідження.*

19. Цірук Г.В. Балансування металевого резонатора вібраційного гіроскопа / О.В. Петренко, Г.В. Цірук // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM». – НАУ, Київ, 2018. – С.82. *Здобувачем обґрунтовано доцільність використання методики балансування.*

АНОТАЦІЯ

Цірук Г.В. Компенсація похибок та зовнішніх збурень при вимірюванні кутової швидкості вібраційним датчиком диференційного типу. – 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, 2019.

Дисертаційна робота посвячена науковому обґрунтуванню та розробки алгоритмів компенсації внутрішніх похибок та зовнішніх збурень у вібраційному датчику кутової швидкості диференційного типу, а також удосконалення системи управління стоячої хвилею так, щоб вона дозволяла автоматично перемикатися з диференційного режиму роботи на відповідні режими датчика кутової швидкості і датчика кута (інтегруючий режим).

Розроблена нелінійна модель вібраційного датчика кутової швидкості диференційного типу, яка складається з моделі чутливого елемента, що є відома та системи управління і обробки інформації, що була розроблена та зв'язано їх у єдину вимірювальну систему так, щоб вона дозволяла автоматично переключати три режими роботи датчика.

Експериментальними дослідженнями зразка вібраційного датчика кутової швидкості диференційного типу чисельно визначені ступені компенсації внутрішніх шумів і наступних зовнішніх збурень: ударних збурень, вібраційних збурень, звукових імпульсів на резонансній частоті і звукових шумів, що охоплюють резонансну частоту, а також постійних та змінних магнітних полів.

Ключові слова: вібраційний датчик кутової швидкості, диференційний режим, інтегруючий режим, режим вимірювання кутової швидкості, зовнішні збурення, ступінь компенсації, управління стоячою хвилею, регулятор, відклик на одиничний скачок.

АННОТАЦІЯ

Цирук А.В. Компенсация погрешностей и внешних возмущений при измерении угловой скорости вибрационным датчиком дифференциального типа. - 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, 2019.

Диссертация посвящена научному обоснованию и разработке алгоритмов компенсации внутренних погрешностей и внешних возмущений в вибрационном датчике угловой скорости дифференциального типа, а также совершенствованию системы управления стоячей волной так, чтобы она позволяла автоматически переключаться с дифференцированного режима работы на соответствующие режимы датчика угловой скорости и датчика угла (интегрирующего режима).

В работе выведены уравнения измерений угловой скорости вибрационным датчиком дифференциального типа с учетом различных коэффициентов преобразования деформации в напряжение, которые снимаются с электродов и на основе этих уравнений выведены условия компенсации перекрестного демпфирования резонатора вибрационного датчика, что уменьшает погрешность измерения угловой скорости.

Разработана нелинейная модель вибрационного датчика угловой скорости дифференциального типа, которая состоит из известной модели чувствительного элемента и системы управления и обработки информации, которая была разработана. Эти две модели были связаны в единую измерительную систему так, чтобы она позволяла автоматически переключать три режима работы датчика.

На основе выведенных уравнений, получены условия и даны рекомендации о выставке угла волны такой, при которых в дифференциальном вибрационном датчике угловой скорости (ВДУС) компенсируется смещение нуля.

Разработана процедура определения смещения нуля дифференциального типа численно определены степени ВДКШ, основанная на переориентации стоячей волны, которую рекомендуется проводить каждый раз после включения ДУС, обеспечивая повторяемость смещения нуля от включения к включению на уровне 0.033 град/ч независимо от ориентации оси чувствительности относительно вектора угловой скорости вращения земли.

Разработанный алгоритм компенсации смещения нуля, путем модуляции разности фаз сигналов двух измерительных каналов X и Y, когда период модуляции разности фаз значительно меньше времени корреляции изменения смещения нуля от температуры. Разработана блок схема системы управления дифференциального ВДУС, что обеспечивает такую модуляцию.

Представлены измерения температурной зависимости угла волны θ^* для экспериментального образца дифференциального ВДУС. Экспериментально показано, что этот угол очень слабо зависит от температуры, имея температурный коэффициент на уровне $3 \times 10^{-4} \text{ \%}/^\circ\text{C}$. Была впервые построена нелинейная модель ВДУС, которая дает возможность исследовать влияние различных внешних действующих факторов на выходной сигнал ВДУС и оценивать его точность. Показано, что разработанная модель позволяет задавать внутренние динамические параметры ВДУС, такие как добротность, резонансную частоту, разносторонность, разночастотность и их изменения во времени, а также направление главных осей жесткости и демпфирования. Разработанная модель реализует все три режима работы ВДУС.

Выведена зависимость между электрическим напряжением на выходе ВДУС и величиной входного удара от параметров пьезоэлектродов для двух конструкции металлического резонатора, что позволяет исследовать влияние удара на выходной сигнал дифференциального ВДКШ.

Впервые была построена компьютерная Simulink модель трех-режимного ВДУС с режимами измерения угловой скорости, интегрирующим режимом и третьим, дифференциальным режимом, с автоматическим переключением из режима на режим. Трех-режимный ВДУС может обеспечить высокую гибкость при выполнении противоречивых требований многих важных применений, например, широкий частотный и динамический диапазоны при измерении больших угловых скоростей и одновременно малые шумы при измерении малых угловых скоростей.

В работе экспериментально показано, что дифференциальный режим работы имеет больше, чем режим ДУС коэффициент подавления внешних возмущений: ударных возмущений, вибрационных возмущений, звуковых импульсов на и меньшую чувствительность к таким возмущений, как: удары, вибрации, акустические импульсы, магнитные поля. Смещение нуля дифференциального ВДУС в течение синусоидальной вибрации в диапазоне частот до 300 Гц меньше, чем ВДУС, работающего в режиме ДУС примерно в 10 раз. Было обнаружено, что чувствительность смещение нуля до вибрационного ускорения, также зависит от частоты синусоидальной вибрации. Эта зависимость близка к линейной.

Экспериментальные исследования показали, что шум дифференциального ВДУС меньше шума ВДУС, работающего в режиме ВДУС при наличии внешних вибраций. Было также экспериментально показано, что компоненты более высокой частоты, такие как белый шум и случайное блуждание, почти не зависят от амплитуды синусоидальной

вибрации при несколько меньших шумовых компонентах для дифференциального канала.

Экспериментально показано, что акустические импульсы близкие к резонансной частоте и звуковые шумы, спектр которых охватывает резонансную частоту, а также постоянных и переменных магнитных полей подавляются дифференциальным ВДУС в 65 (36 дБ) и 76 (37.6 дБ) раза. Данные коэффициенты подавления являются большими, чем аналогичные показатели, которые можно достичь при использовании современных звукоизоляционных материалов.

Коэффициенты подавления магнитного поля вдоль и перпендикулярно ОЧ дифференциального ВДУС, равны 10 и 25 соответственно.

Ключевые слова: вибрационный датчик угловой скорости, дифференциальный режим, интегрирующий режим, режим измерения угловой скорости, внешние возмущения, степень компенсации, управления стоячей волной, регулятор, отклик на единичный скачок.

ABSTRACT

Tsiruk H.V. Compensation of Errors and External Disturbances Under Measuring of Angle Rate by Vibratory Sensor of Differential Type. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a candidate of sciences degree in specialty 05.11.01 – instruments and methods for measuring mechanical quantities. – National Aviation University, Kyiv, 2019.

The thesis is devoted to the scientific substantiation and development of algorithms for the compensation of internal errors and external disturbances in an angle rate sensor of differential type, as well as the improvement of the standing wave control system so that it can automatically switch from a differential mode of operation to the corresponding rate and rate integrating (whole angle) modes.

Non-linear model of an angular rate sensor of differential type has been developed, which consists of a well-known model of a sensitive element and control system and information processing algorithm that has been developed. These two models were connected in a single measuring system so that it allows one to automatically switch the three modes of sensor's operation.

By experimental investigations of an angular rate sensor sample of differential type have been numerically determined the degree of compensation for internal errors and the following external disturbances: shock disturbances, vibration disturbances, sound pulses at the resonant frequency and sound noises covering the resonant frequency, as well as constant and variable magnetic fields.

Key words: Vibratory angle rate sensor, differential mode, integrating mode, rate mode, external disturbances, degree of compensation, standing wave control, controller, step response.