

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”

АПОСТОЛЮК ВЛАДИСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 531.383

**УЗАГАЛЬНЕНА ТЕОРІЯ ТА МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ
КОРІОЛІСОВИХ ВІБРАЦІЙНИХ ГІРОСКОПІВ**

Спеціальність 05.11.03 – Гіроскопи та навігаційні системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі приладів і систем керування літальними апаратами Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
ЗБРУЦЬКИЙ Олександр Васильович
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”,
декан факультету авіаційних і космічних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
ЧЕРНЯК Сергій Іванович
Казенне підприємство СПБ «Арсенал»,
головний конструктор напрямку

доктор технічних наук, професор
ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович
Житомирський державний технологічний університет,
кафедра комп’ютеризованих систем управління та
автоматики, завідувач кафедри

доктор технічних наук, професор
СИНЄГЛАЗОВ Віктор Михайлович
Національний авіаційний університет,
кафедра авіаційних комп’ютерно-інтегрованих
комплексів, завідувач кафедри

Захист відбудеться “29” червня 2016 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.07 при Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп.1, ауд. 317.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, м.Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий “ 26 ” травня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доцент



Ю.В. Киричук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Коріолісові вібраційні гіроскопи (КВГ) отримали та продовжують отримувати дедалі більш широке застосування завдяки низькій ціні при масовому виробництві із використанням технологій мікро-електро-механічних систем (MEMS). Тільки в 2015 році в світі було продано майже *півтора мільярди* смартфонів, в яких мікромеханічні коріолісові вібраційні гіроскопи використовуються в якості датчиків кутової швидкості. Мініатюрні коріолісові вібраційні гіроскопи також застосовуються в сучасних системах навігації і керування малими безпілотними літальними апаратами, автомобілями, роботами, тощо. Якщо спочатку гіроскопи використовувались в якості датчиків руху низької точності в пристроях мобільної комунікації та переносних комп'ютерах, то за наявного широкого поширення почали з'являтися нові застосування із новими вимогами щодо покращення вимірювальних характеристик. Серед них необхідно зазначити визначення орієнтації в системах доповненої і віртуальної реальності, системи мобільної інерціальної навігації, та інші. Вказані нові застосування потребують підвищення точності вимірювання кутової швидкості, збільшення динамічного діапазону, зменшення зсуву нуля, фільтрації шумів вимірювання, а також реалізації режимів компенсаційного та інтегруючого гіроскопів.

Дослідженню динаміки коріолісових вібраційних гіроскопів присвячено багато робіт Л.І. Брозгуля, Є.Л. Смірнова, Б. Фрідленда, М. Хаттона та інших, в яких рух чутливих елементів вивчався за допомогою рівнянь, в яких враховувався тільки вплив коріолісового прискорення. Повні математичні моделі руху чутливих елементів для окремих типів коріолісових вібраційних гіроскопів розроблялися пізніше в роботах В. Журавльова, Д. Клімова, Д. Лінча, Я. Содерквіста, М. Павловського, А. Збруцького, В. Чіковані та інших.

Аналіз цих публікацій показав, що рух чутливих елементів зазвичай вивчається із використанням спрощених математичних моделей, побудованих на основі базових рівнянь руху, в яких відсутні важливі складові прискорення, що не дозволяють вивчати обмежений нелінійністю масштабного коефіцієнта діапазон вимірювання, вплив змінного у часі характеру кутової швидкості, тощо. Існуючі математичні моделі розроблялися та можуть застосовуватися лише до конкретних конструкцій чутливих елементів, не дозволяючи їх узагальнення. Аналіз динаміки чутливих елементів проводиться в термінах їх модульованих первинних та вторинних рухів за умов сталої кутової швидкості, де кутова швидкість виступає в якості невідомого коефіцієнта, а не в якості входу до вимірювальної динамічної системи, що б дозволило застосовувати існуючі методи синтезу систем фільтрації та керування. Системи керування синтезуються за допомогою охоплення чутливих елементів позиційним та швидкісним зворотним зв'язком, коефіцієнти яких обираються емпірично, або за допомогою числового моделювання. Розрахунок та оптимізація вимірювальних характеристик конкретних конструкцій коріолісових вібраційних гіроскопів зазвичай проводиться із використанням числового моделювання, а також числового розв'язку рівнянь руху чутливих елементів.

Тому актуальним є узагальнення та покращення математичних моделей руху чутливих елементів і створення на їх основі ефективних методів розрахунку

вимірювальних характеристик, конструктивних параметрів чутливих елементів на основі бажаних вимірювальних характеристик, методів реалістичного числового моделювання, методів та алгоритмів компенсації похибок вимірювання кутової швидкості. Існує необхідність в створенні методів вибору конструктивних параметрів чутливих елементів, розробці методів і алгоритмів фільтрації вихідних сигналів як модульованих, так і демодульованих, що покращують вимірювальні характеристики, а також в методах керування чутливим елементом, які реалізують різні режими роботи гіроскопів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, результати яких викладені в дисертації, пов'язані з науковими темами та планами кафедри приладів та систем керування літальними апаратами НТУУ "КПІ" в рамках наступних науково-дослідних робіт: "Розробка методів проектування і випробувань мініатюрних інтелектуальних систем керування безпілотними апаратами" (№ держреєстрації 0108U000514), "Створення фізико-технічних основ побудови мультисенсорних мікромеханічних систем вимірювання кінематичних параметрів" (договір Ф7/549-2001 від 28.11.2001), "Розробка та дослідження навігаційних систем нового покоління для аерокосмічної техніки з використанням мікромеханічних технологій та GPS/ГЛОНАСС приймачів" (№ держреєстрації 0102U000564).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є розвиток і узагальнення теорії коріолісових вібраційних гіроскопів, створення на її основі ефективних методів розрахунку та оптимізації вимірювальних характеристик, методів та алгоритмів керування чутливим елементом, компенсації похибок, обробки та фільтрації вихідних сигналів.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати наступні групи задач:

- Розвинути та узагальнити теорію чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів, на основі якої дослідити залежності та похибки вимірювальних характеристик коріолісових вібраційних гіроскопів від конструктивних параметрів чутливого елемента, прискорень, вібрації, варіацій кутової швидкості та температури; розробити методи розрахунку та оптимізації вимірювальних характеристик, а також методи розрахунку конструктивних параметрів чутливих елементів з метою отримання бажаних вимірювальних характеристик.
- Розробити математичну модель коріолісових вібраційних гіроскопів в демодульованих сигналах та отримати структурні схеми і передатні функції для використання їх в системах обробки сигналів та автоматичного керування; розробити та дослідити низькорівневі методи компенсації небажаних перехресних зв'язків та перехресної чутливості, методи компенсації похибок вимірювання кутової швидкості.
- Розробити алгоритми та програмне забезпечення для автоматизованого проектування чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів, які виготовляються за допомогою технологій мікро-електромеханічних систем, а також системи числового моделювання їх роботи на основі повної математичної моделі в середовищі Сімулінк/Матлаб.

Об'єктом досліджень є коріолісові вібраційні гіроскопи.

Предметом досліджень є математичні моделі коріолісових вібраційних гіроскопів, як сенсорів навігаційних систем, методи їх проектування та обробки вихідних сигналів.

Методи дослідження. Диференціальні рівняння руху чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів було отримано із використанням методів аналітичної механіки, а саме рівняння Лагранжа. Розв'язки рівнянь руху отримані як традиційними методами аналізу диференціальних рівнянь, так і використовуючи запропоновану в роботі модифікацію метода усереднення, отримані рівняння руху чутливих елементів в термінах комплексних амплітудно-фазових змінних, які дозволили проводити аналіз в демодульованих сигналах. Із використанням перетворення Лапласа та методів теорії автоматичного керування були отримані повні та спрощені передатні функції коріолісових вібраційних гіроскопів. Ці передатні функції дозволили синтезувати методи фільтрації шумів вимірювання та стохастичних збурень із використанням методу статичної стохастичної фільтрації Вінера та адаптивної фільтрації за алгоритмом Калмана.

Коректність отриманих результатів та ефективність розроблених методів і алгоритмів перевірялась за допомогою реалістичного числового моделювання в програмному середовищі Сімулінк/Матлаб, а також за допомогою відповідних експериментальних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів. Виконані в дисертаційній роботі дослідження дозволили отримати наступні нові наукові результати:

В науковому плані

- Вперше дістали подальший розвиток та були узагальнені до єдиної системи рівняння руху чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів з поступальними, обертальними та хвильовими первинними та вторинними рухами, на основі розв'язків яких вперше було отримано вирази для розрахунку параметрів первинного і вторинного руху чутливих елементів, розрахунку і оптимізації масштабного коефіцієнта із врахуванням його нелінійності, розрахунку динамічного діапазону, роздільної здатності, зсуву нуля, а також розрахунку похибок вимірювання кутової швидкості. Вперше отримано точні та наближені вирази для розрахунку параметрів фазової траєкторії руху та власних частот коливань чутливого елемента в залежності від кутової швидкості.
- Вперше розроблено узагальнену математичну модель руху чутливого елемента в демодульованих сигналах в залежності від змінної в часі кутової швидкості, на основі якої вперше отримано точні і спрощені наближені передатні функції коріолісового вібраційного гіроскопа від кутової швидкості до амплітуди вторинних коливань і кута повороту фазової траєкторії руху чутливого елемента, вирази для розрахунку і оптимізації динамічної похибки і смуги пропускання, передатні функції статичних систем оптимальної фільтрації шумів вимірювання і стохастичних збурень, передатні функції замкнених систем керування чутливим елементом в режимах компенсаційного та інтегруючого гіроскопа.
- Вперше отримані передатні функції і структуру низькорівневих систем повної та часткової компенсації небажаних перехресних зв'язків і перехресної

чутливості в модульованих сигналах, а також структуру і передатні функції систем компенсації і фільтрації температурних похибок вимірювання кутової швидкості.

В прикладному плані

- Розроблені узагальнені методи розрахунку і вибору парціальних частот і коефіцієнтів демпфування первинних і вторинних коливань чутливих елементів задля забезпечення бажаного діапазону лінійного вимірювання кутової швидкості, смуги пропускання та оптимального перехідного процесу, мінімізації зсуву нуля і впливу зовнішніх вібрацій.
- Отримані методи реалізації режимів оптимального збудження первинних коливань за допомогою електростатичного гребінчастого двигуна, які дозволяють значно зменшити рівень шумів на робочій частоті, та досліджено небажаний вплив його конструктивних параметрів на власну частоту первинних коливань.
- Розроблено системи оптимальної фільтрації шумів вимірювання і стохастичних збурень, системи керування демодульованим рухом чутливого елемента в режимах компенсаційного датчика кутової швидкості, інтегруючого гіроскопа, системи компенсації небажаних перехресних зв'язків і температурних похибок, а також систему рекурсивної ідентифікації параметрів динаміки чутливого елемента, що дозволяє ефективно оцінювати параметри математичної моделі його динаміки.
- Розроблено алгоритми та програмне забезпечення для автоматизованого проектування чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів, які виготовляються за допомогою технологій мікро-електромеханічних систем, які значно зменшили час проектування чутливих елементів, а також системи числового моделювання їх роботи на основі повної моделі динаміки чутливого елемента в середовищі Сімулінк/Матлаб.

Практичне значення одержаних результатів. Наукові та практичні результати дисертаційної роботи були впроваджені:

1. Науково-виробничим об'єднанням Київський завод автоматики ім. Г.І. Петровського у вигляді математичних моделей похибок та методів оптимального проектування чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів, методів та систем усунення небажаних перехресних зв'язків, методів та алгоритмів фільтрації вихідних сигналів та методів керування у режимі інтегруючого гіроскопа. В результаті впровадження зазначених математичних моделей, методів та алгоритмів керування було отримано результати, які підтвердили їх високу ефективність у покращенні вимірювальних характеристик коріолісових вібраційних гіроскопів.
2. Кафедрою приладів та систем керування літальними апаратами факультету авіаційних і космічних систем Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" в навчальний процес кафедри в лекціях з курсу "чутливі елементи систем керування літальних апаратів" та в науковій роботі магістрів спеціальності 8.100104 «Системи керування літальними апаратами».

Особистий внесок здобувача. Розвинена узагальнена теорія чутливих елементів коріюлісових вібраційних гіроскопів в модульованих та демодульованих сигналах, вирази для розрахунку їх вимірювальних характеристик, методи вибору та оптимізації конструктивних параметрів, структурні схеми та передатні функції в системах фільтрації, керування та компенсації похибок були отримані особисто здобувачем.

Апробація результатів дисертації. Наукові та практичні результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на: міжнародному симпозіумі по гіроскопічним технологіям в Штутгарті (Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Germany, 2002), міжнародних науково-технічних конференціях "Авіа-ІХ" (2009) та "Авіа-Х" (2011) у Національному авіаційному університеті (Київ, Україна), 17-тій Санкт-Петербурзькій міжнародній конференції по інтегрованим навігаційним системам (2010, Санкт-Петербург, Росія), міжнародній науково-технічній конференції ІЕЕЕ "Методи та системи навігації та керування рухом" (2010, 2012, 2014, Національний авіаційний університет, Київ, Україна), міжнародній науково-технічній конференції "Гіротехнології, навігація керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки" (2011 та 2013, Національний технічний університет України "КПІ", Київ, Україна), всесвітньому конгресі "Авіація в ХХІ сторіччі – Безпека в авіаційних та космічних технологіях" (2012, Національний авіаційний університет, Київ, Україна).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 30 наукових праць, у тому числі 1 монографія в іноземному видавництві, 19 статей у наукових фахових виданнях, з яких 3 статті у виданнях іноземних держав, 10 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура і об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 7-ох розділів, висновків, списку літератури та додатків, і викладена на 245 сторінках, включаючи 135 рисунків, 1 таблицю, список літератури зі 159 публікацій на 16 сторінках, та додатку.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертаційних досліджень, формулюється їх мета і задачі, визначається об'єкт і обирається предмет досліджень, зазначаються методи досліджень, перелічуються зв'язки роботи з науковими програмами, планами, темами, визначається наукова новизна отриманих результатів та їх практичне значення, особистий вклад здобувача і апробація здобутих результатів дисертаційного дослідження.

В **розділі 1** розглянуто класифікацію (рис. 1) та основні схеми побудови чутливих елементів для найбільш поширених типів коріюлісових вібраційних гіроскопів: проста одномасова, віброуюча балка, одномасова з додатковою рамкою (з обертальним та поступальним рухом чутливого елемента), колісна, камертонна та кільцева.

Аналіз публікацій по теорії та методам проектування коріюлісових вібраційних гіроскопів показав, що рух їх чутливих елементів вивчається із використанням математичних моделей, побудованих на основі базових рівнянь руху, в яких відсутні

важливі складові прискорення, що не дозволяють, наприклад, вивчати обмежений нелінійністю масштабного коефіцієнта діапазон вимірювання, або вплив змінної в часі кутової швидкості.

Існуючі математичні моделі розроблялися та можуть застосовуватися лише до конкретних конструкцій чутливих елементів, не дозволяючи їх узагальнення. Аналіз динаміки чутливих елементів проводиться в термінах їх модульованих первинних та вторинних рухів за умов сталої кутової швидкості, де кутова швидкість виступає в якості невідомого коефіцієнта, а не в якості входу до вимірювальної динамічної системи, що б дозволило застосовувати існуючі методи синтезу систем фільтрації та керування. Аналіз динамічної похибки та методи розрахунку смуги пропускання вимагають при цьому проводити демодуляцію отриманих розв'язків.

Системи керування створюються за допомогою охоплення чутливих елементів зворотним зв'язком, коефіцієнти якого підбираються за допомогою числового моделювання. Розрахунок та оптимізація вимірювальних характеристик конкретних конструкцій коріолісових вібраційних гіроскопів, як правило, проводиться із використанням числового моделювання, а також числового розв'язку рівнянь руху чутливих елементів. Це визвано тим, що невідома кутова швидкість є параметром рівняння, і корисна інформація про неї знаходиться не в первинних і вторинних рухах чутливого елемента, а в амплітудах і фазах його коливань.

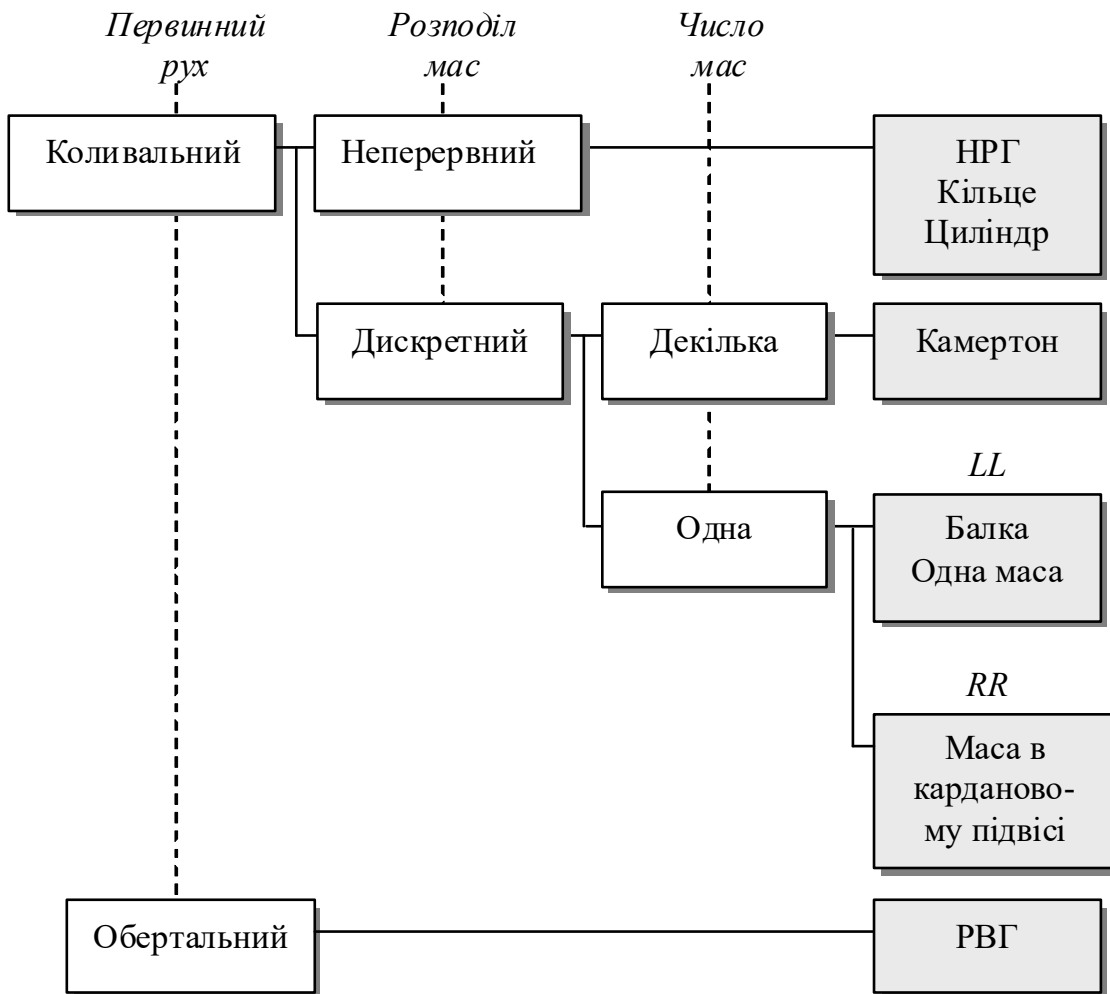


Рис. 1. Класифікація коріолісових вібраційних гіроскопів

Враховуючи величезне розповсюдження коріолісових вібраційних гіроскопів в сучасних системах навігації, керування та в якості датчиків руху в пристроях мобільної комунікації, і враховуючи існуючі потреби в покращенні їх вимірювальних характеристик та сучасний стан теорії та методів проектування чутливих елементів, актуальним є узагальнення та покращення математичних моделей руху чутливих елементів і створення ефективних методів розрахунку вимірювальних характеристик, методів розрахунку конструктивних параметрів чутливих елементів на основі бажаних вимірювальних характеристик, методів реалістичного числового моделювання, методів та алгоритмів компенсації похибок вимірювання кутової швидкості.

Розділ 2 присвячений аналізу рівнянь руху чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів наступних схем: з поступальним та обертальним рухом чутливих елементів з додатковою рамкою, камертонним та кільцевим чутливими елементами. В результаті було розвинуто та узагальнено рівняння руху чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів різних схем, що дозволяють аналізувати рух та оптимізувати конструкцію їх чутливих елементів:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + 2\zeta_1\omega_1\dot{x}_1 + (\omega_1^2 - d_1\Omega^2)x_1 = q_1 - g_1\Omega\dot{x}_2 - d_3\dot{\Omega}x_2, \\ \ddot{x}_2 + 2\zeta_2\omega_2\dot{x}_2 + (\omega_2^2 - d_2\Omega^2)x_2 = q_2 + g_2\Omega\dot{x}_1 + d_4\dot{\Omega}x_1. \end{cases} \quad (1)$$

Тут x_1 і x_2 є узагальненими переміщеннями, що описують первинний і вторинний рух чутливого елемента (як поступальний, так і обертальний); ω_1 та ω_2 - парціальні частоти, ζ_1 і ζ_2 - коефіцієнти демпфування первинного та вторинного рухів відповідно; q_1 і q_2 - узагальнені прискорення чутливого елемента від прикладених до нього зовнішніх сил, або моментів, Ω є кутовою швидкістю, яка ортогональна до площини первинного і вторинного рухів. Коефіцієнти, що залишилися, є функціями параметрів конструкції чутливого елемента і наведені у таблиці 1.

Наведені в таблиці 1 коефіцієнти мають наступний зміст: m_1 та m_2 - узагальнені маси при поступальному первинному та вторинному русі чутливого елемента, I_{1x} , I_{2y} - моменти інерції при обертальному русі, де перший індекс визначає первинний, або вторинний рух, а другий - відповідну вісь, навколо якої здійснюється обертання, r - відстань від осі обертання чутливого елемента камертонного гіроскопа до центру мас у стані спокою, c - коефіцієнт Брайана для кільцевого чутливого елемента.

Результати аналізу динаміки чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів на основі рівнянь (1), а також методології проектування на їх основі, можуть у повній мірі застосовуватися для всіх типів коріолісових вібраційних гіроскопів у таб. 1.

Методологія отримання рівнянь руху чутливих елементів за допомогою рівнянь Лагранжа 2-го роду та визначення відповідності їх коефіцієнтів параметрам узагальненої моделі може бути легко застосована до будь яких типів коріолісових вібраційних гіроскопів. Це дає можливість переносити результати досліджень узагальненої моделі (1) на конкретний коріолісовий вібраційний гіроскоп.

Таблиця 1. Коефіцієнти узагальнених рівнянь руху

ЧЕ:	Балочна	ЛЛ-гіроскоп	ОО-гіроскоп	Камертон	Кільце
g_1	2	$\frac{2m_2}{m_1 + m_2}$	$\frac{I_{2x} + I_{2y} - I_{2z}}{I_{1y} + I_{2y}}$	$4r$	$2c$
g_2	2	2	$\frac{I_{2x} + I_{2y} - I_{2z}}{I_{2x}}$	$\frac{2mr}{I_z}$	$2c$
d_1	1	1	$\frac{I_{1x} - I_{1z} + I_{2x} - I_{2z}}{I_{1y} + I_{2y}}$	1	1
d_2	1	1	$\frac{I_{2y} - I_{2z}}{I_{2x}}$	0	1
d_3	1	$\frac{m_2}{m_1 + m_2}$	$\frac{I_{2y} - I_{2z}}{I_{1y} + I_{2y}}$	0	c
d_4	1	1	1	$\frac{2mr}{I_z}$	c

Таким чином, в роботі вперше дістали подальший розвиток та були узагальнені до єдиної системи рівняння руху чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів з поступальними, обертальними та хвильовими первинними та вторинними рухами.

В розділі 3 проводиться аналіз динаміки чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів на основі їх узагальнених рівнянь руху (1). Отримано вирази для розрахунку сталих амплітуд первинних і вторинних коливань, що відповідають сталій кутовій швидкості:

$$A_{10} = \frac{q_{10} \sqrt{(\omega_2^2 - d_2 \Omega^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_2^2 \omega_2^2 \omega^2}}{|\Delta|}, \quad A_{20} = \frac{g_2 q_{10} \omega}{|\Delta|} \Omega, \quad (2)$$

де

$$|\Delta|^2 = [(\omega_1^2 - d_1 \Omega^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - d_2 \Omega^2 - \omega^2) - \omega^2 (g_1 g_2 \Omega^2 + 4\zeta_1 \zeta_2 \omega_1 \omega_2)]^2 + 4\omega^2 [\zeta_1 \omega_1 (\omega_2^2 - d_2 \Omega^2 - \omega^2) + \zeta_2 \omega_2 (\omega_1^2 - d_1 \Omega^2 - \omega^2)],$$

та вирази для відповідних фаз

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\varphi_1) &= \frac{2\omega [(\omega_2^2 - d_2 \Omega^2 - \omega^2)b_1 + \omega_2 \zeta_2 b_2]}{(\omega_2^2 - d_2 \Omega^2 - \omega^2)b_2 - 4\omega_2 \zeta_2 \omega^2 b_1}, \\ \operatorname{tg}(\varphi_2) &= \frac{(\omega_1^2 - d_1 \Omega^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - d_2 \Omega^2 - \omega^2) - \omega^2 (4\zeta_1 \zeta_2 \omega_1 \omega_2 + g_1 g_2 \Omega^2)}{2\omega [\omega_1 \zeta_1 (\omega_2^2 - d_2 \Omega^2 - \omega^2) + \omega_2 \zeta_2 (\omega_1^2 - d_1 \Omega^2 - \omega^2)]}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$b_1 = \omega_1 \zeta_1 (\omega_2^2 - d_2 \Omega^2 - \omega^2) + \omega_2 \zeta_2 (\omega_1^2 - d_1 \Omega^2 - \omega^2),$$

$$b_2 = (\omega_1^2 - d_1 \Omega^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - d_2 \Omega^2 - \omega^2) - \omega^2 (4\zeta_1 \zeta_2 \omega_1 \omega_2 + g_1 g_2 \Omega^2).$$

Тут q_{10} - амплітуда прискорення чутливого елемента від системи збудження первинних коливань, ω - частота збудження первинних коливань.

Вирази (2) і (3) були отримані з розв'язків системи (1), що відповідають вимушеним первинним і вторинним коливанням, за допомогою переходу до комплексних амплітуд

$$\begin{aligned} A_1 &= A_{10} e^{i\varphi_{10}}, \\ A_2 &= A_{20} e^{i\varphi_{20}}. \end{aligned}$$

Тут A_{10} , A_{20} , φ_{10} , і φ_{20} є *постійними* дійсними амплітудами і фазами первинних і вторинних коливань відповідно.

На основі аналізу розв'язків характеристичного рівняння системи (1) за умов відсутності демпфування ($\zeta_1 = \zeta_2 = 0$), в роботі вперше були отримані вирази для розрахунку власних частот первинних і вторинних коливань в залежності від відносної кутової швидкості обертання основи:

$$\begin{aligned} \delta\omega_{j0}^2 &= \frac{1}{2} [1 + \delta k^2 - (d_1 + d_2 - g_1 g_2) \delta\Omega^2] + \frac{(-1)^j}{2} \{ 4(\delta k^2 - d_1 \delta\Omega^2)(d_2 \delta\Omega^2 - 1) + \\ &+ [1 + \delta k^2 - (d_1 + d_2 - g_1 g_2) \delta\Omega^2]^2 \}^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

Тут $k = \omega_1$, $\delta k = \omega_2 / \omega_1$, $\delta\Omega = \Omega / k$.

В цьому розділі було вперше отримано вирази для розрахунку параметрів еліптичної фазової траєкторії його руху (рис. 2) в залежності від кутової швидкості, що стало можливим завдяки запропонованій в роботі апроксимації для розрахунку великої (a) та малої (b) напіввісей:

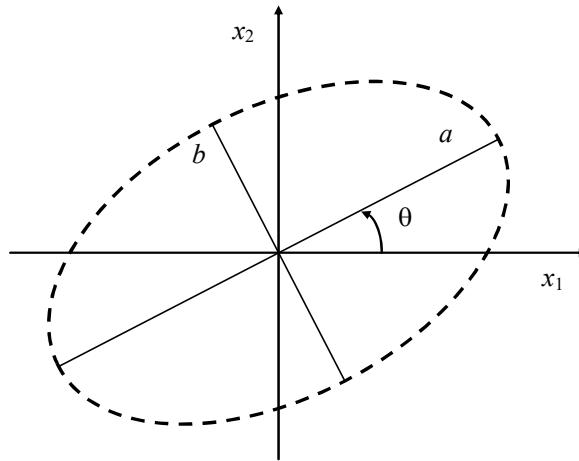


Рис. 2. Фазова траєкторія руху центра мас чутливого елемента

$$\begin{aligned} a &= \frac{q_{10} (4k^2 R^2 \zeta_1 + g_2^2 q_{10} \delta\Omega^2)}{8k^4 R^2 \zeta_1}, \\ b &= \frac{q_{10} g_2 (1 - \delta k^2)}{\sqrt{2k^2 R \zeta_1} \sqrt{R^2 + g_2^2 \delta\Omega^2 + \sqrt{R^4 - 2g_2^2 (R^2 - 8\zeta_2^2 \delta k^2) \delta\Omega^2 + g_2^4 \delta\Omega^4}}} \delta\Omega, \\ R &= \sqrt{\delta k^4 - 2(1 - 2\zeta_2^2) \delta k^2 + 1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Важливою характеристикою еліптичної фазової траєкторії є кут її обертання в залежності від кутової швидкості $\delta\Omega$, який розраховується як

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{4g_2 \zeta_2 \delta k \delta \Omega}{1 - 2(1 - 2\zeta_2^2) \delta k^2 + \delta k^4} \right], \quad (6)$$

або за отриманою в роботі наступною лінійною апроксимацією

$$\theta \approx \frac{2g_2 \zeta_2 \delta k}{1 - 2(1 - 2\zeta_2^2) \delta k^2 + \delta k^4} \delta \Omega. \quad (7)$$

Виявлена залежність кута обертання траєкторії руху чутливого елемента від кутової швидкості дозволяє розробляти методи вимірювання кутової швидкості, відмінні від безпосереднього вимірювання амплітуди вторинних коливань.

Отримані розв'язки узагальнених рівнянь руху коріолісових вібраційних гіроскопів не тільки дозволяють аналізувати параметри руху чутливого елемента на основі, що обертається, але також являють собою основу для подальшого обчислення і оптимізації основних вимірювальних характеристик. А запропонована схема числового моделювання руху чутливого елемента на основі повної математичної моделі дозволяє оцінювати ефективність отриманих результатів.

Таким чином в роботі отримані вирази для розрахунку амплітуд і фаз первинного і вторинного руху в залежності від зовнішньої кутової швидкості і параметрів чутливого елемента на основі повних узагальнених рівнянь руху, вирази для розрахунку власних частот первинних і вторинних коливань в залежності від кутової швидкості за умови малого демпфування, точні та наближені вирази для розрахунку напіввісей та кута повороту фазової траєкторії руху чутливого елемента в залежності від конструктивних параметрів чутливих елементів, схеми числового моделювання роботи коріолісових вібраційних гіроскопів на основі повної узагальненої математичної моделі в програмному середовищі Сімулінк/Матлаб, а також продемонстровано можливість використання кута повороту фазової траєкторії руху чутливого елемента для вимірювання кутової швидкості.

Розділ 4 присвячений розробці математичної моделі динаміки чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів в демодульованих сигналах. Рівняння руху чутливого елемента в термінах комплексних амплітуд мають вигляд

$$\begin{cases} \ddot{A}_1 + 2(\zeta_1 \omega_1 + j\omega) \dot{A}_1 + (\omega_1^2 - \omega^2 + 2j\omega \omega_1 \zeta_1) A_1 = q_{10}, \\ \ddot{A}_2 + 2(\zeta_2 \omega_2 + j\omega) \dot{A}_2 + (\omega_2^2 - \omega^2 + 2j\omega \omega_2 \zeta_2) A_2 \\ = (j\omega g_2 \Omega + d_4 \dot{\Omega}) A_1 + g_2 \dot{A}_1 \Omega. \end{cases} \quad (8)$$

Тут $A_1(t) = A_{10}(t)e^{j\varphi_1(t)}$, $A_2(t) = A_{20}(t)e^{j\varphi_2(t)}$, A_{10} і A_{20} є амплітудами первинних і вторинних коливань, φ_{10} і φ_{20} є відповідними фазовими зсувами по відношенню до сили збудження.

На основі аналізу рівнянь руху (8) отримана узагальнена передатна функція коріолісових вібраційних гіроскопів від кутової швидкості до комплексної амплітуди вторинних коливань:

$$W_2(s) = \frac{A_2(s)}{\Omega(s)} = \frac{q_{10}(d_4 s + jg_2 \omega)}{[(s + j\omega)^2 + 2\zeta_2 \omega_2 (s + j\omega) + \omega_2^2][\omega_1^2 - \omega^2 + 2j\omega \omega_1 \zeta_1]}. \quad (9)$$

У випадку амплітуд вторинних коливань, які повільно змінюються в часі, передатна функція (9) може бути спрощена до вигляду

$$W_2(s) = \frac{q_{10}(d_4 s + jg_2 \omega)}{[2\zeta_2 \omega_2 s + \omega_2^2 - \omega^2 + j2\omega(\zeta_2 \omega_2 + s)][\omega_1^2 - \omega^2 + 2j\omega\omega_1 \zeta_1]}. \quad (10)$$

З якої отримано вирази для амплітудної та фазової характеристики коріолісових вібраційних гіроскопів в залежності від частоти λ кутової швидкості

$$A(\lambda) = \frac{q_{10}(d_4 \lambda + g_2 \omega)}{\sqrt{[(\omega_2^2 - (\lambda + \omega)^2)^2 + 4\zeta_2^2 \omega_2^2 (\lambda + \omega)^2][(\omega_1^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_1^2 \omega_1^2 \omega^2]}}, \quad (11)$$

$$\varphi(\lambda) = \arctan \left\{ \frac{[\omega_2^2 - (\lambda + \omega)^2][\omega_1^2 - \omega^2] - 4\omega_1 \omega_2 \zeta_1 \zeta_2 \omega (\lambda + \omega)}{2[\omega_2 \zeta_2 (\lambda + \omega)(\omega_1^2 - \omega^2) + \omega_1 \zeta_1 \omega (\omega_2^2 - (\lambda + \omega)^2)]} \right\}.$$

Вирази (11) дозволяють аналізувати зміну реакції чутливого елемента по амплітуді і фазі на гармонічну кутову швидкість в залежності від частоти останньої.

Передатна функція (9) дозволила провести аналіз стійкості та оптимізацію перехідного процесу в амплітуді вторинних коливань при ступінчастій кутовій швидкості. Для цього було отримано вирази полюсів передатної функції (9)

$$s_{1,2} = -\omega_2 \zeta_2 \pm j\omega_2 \sqrt{1 - \zeta_2^2} - j\omega. \quad (12)$$

Аналіз полюсів (12) показав, що коливання чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів є природно стійкими, а напівколивальний перехідний процес при ступінчастій кутовій швидкості в термінах коливальності забезпечується наступним відношенням парціальних частот чутливого елемента:

$$\omega_2 = \omega_1 \sqrt{\frac{1 - 2\zeta_1^2}{1 - \zeta_2^2}}. \quad (13)$$

Результати числового моделювання на основі повної математичної моделі перехідних процесів до і після оптимізації показані відповідно на рис 3 і 4.

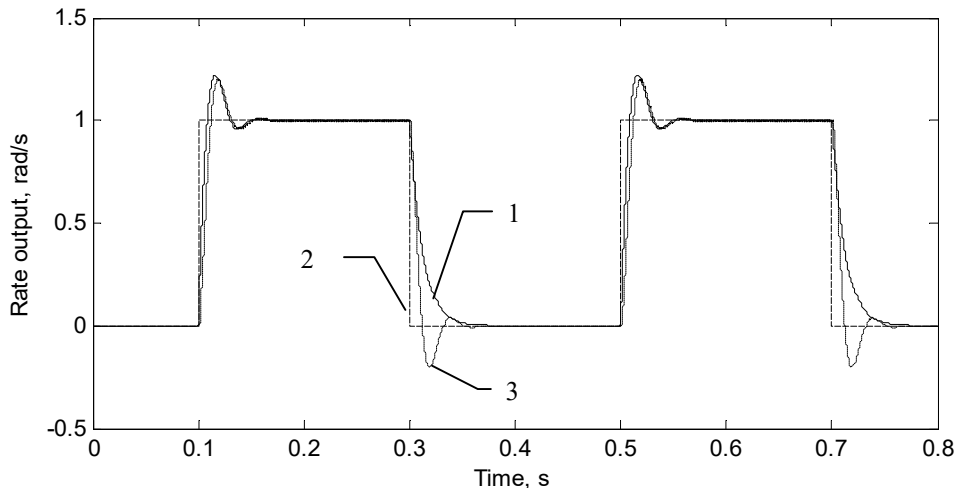


Рис. 3. Неоптимізований перехідний процес.

(1 – вихід передатної функції, 2 – вхідна кутова швидкість, 3 – вихід числового моделювання)

Оскільки передатна функція (9) є комплексною, то це може ускладнювати її ефективне використання в деяких задачах. Для вирішення цієї проблеми було розглянуто важливий спеціальний випадок, коли комплексні передатні функції трансформуються в прості функції із дійсними коефіцієнтами. Припускаючи

рівними первинну і вторинну парціальні частоти ($\omega_1 = \omega_2 = k$) та коефіцієнти демпфування ($\zeta_1 = \zeta_2 = \zeta$), збудження на частоті $\omega = k\sqrt{1 - 2\zeta^2}$, і постійною кутовою швидкістю, можна легко отримати наступну передатну функцію між кутовою швидкістю та дійсною амплітудою вторинних коливань:

$$W_{20}(s) = \frac{A_{20}(s)}{\Omega(s)} = \frac{q_{10} g_2 \sqrt{1 - 2\zeta^2}}{4k^2 \zeta (1 - \zeta^2)(s + k\zeta)}. \quad (14)$$

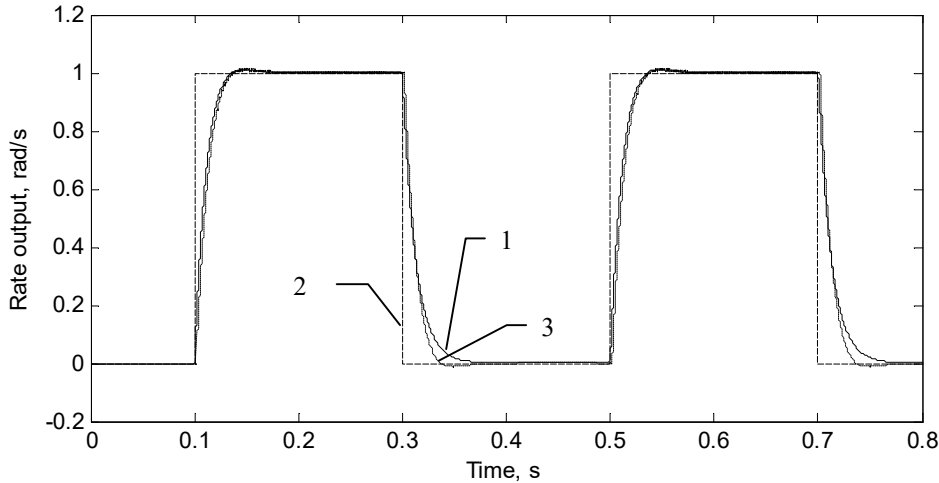


Рис. 4. Оптимізований перехідний процес

(1 – вихід передатної функції, 2 – вхідна кутова швидкість, 3 – вихід числового моделювання)

У разі малого демпфування ($\zeta^2 \ll 1$) передатна функція (14) може бути переписана таким чином:

$$W_{20}(s) \approx \frac{q_{10} g_2}{4k^2 \zeta (s + k\zeta)}. \quad (15)$$

Передатна функція (15) пов'язує вхідну кутову швидкість із амплітудою вторинних коливань. Однак, більш доречною є передатна функція, що зв'язує невідому вхідну кутову швидкість з виміряною на виході чутливого елемента кутовою швидкістю, яку можна легко отримати із (15) шляхом ділення її на усталений масштабний коефіцієнт. Кінцевою передатною функцією є

$$W(s) = \frac{k\zeta}{s + k\zeta}. \quad (16)$$

Для того, щоб оцінити можливість використовувати передатну функцію (16) для чутливих елементів із різними парціальними частотами та різними коефіцієнтами демпфування, в роботі порівняно перехідний процес, описуваний спрощеною передатною функцією, і числовим розв'язком узагальнених рівнянь (1) із подальшою демодуляцією. В якості критерію якості використовувалась наступна функція:

$$J(\delta k, \delta \zeta) = \int_0^T [A_{20}(t) - A_{20}^*(t)]^2 dt. \quad (17)$$

Тут $\delta k = \omega_2 / \omega_1$ є відношенням парціальних частот, $\delta \zeta = \zeta_2 / \zeta_1$ є відношенням відносних коефіцієнтів демпфування, $A_{20}^*(t)$ є демодульованою вторинною амплітудою, яку отримано за допомогою числового моделювання. Графічне зображення функціоналу (17) показано на рис. 5.

Тут центральна зона відповідає ідеально настроєному приладу ($\delta k = 1, \delta \zeta = 1$). Аналіз показує, що широкий діапазон чутливих елементів із змінними відношеннями парціальних частот і відносних коефіцієнтів демпфування також можуть бути представленими передатною функцією (16) з прийнятно низькою інтегральною похибкою (17).

Із використанням отриманих вище передатних функцій чутливого елемента коріолісових вібраційних гіроскопів отримано передатну функцію для кута повороту фазової траєкторії від кутової швидкості:

$$W_{\theta}^{\Omega}(s) = \frac{\theta(s)}{\delta \Omega(s)} = \frac{g_2 k}{2(s + k\zeta)}. \quad (18)$$

Тут $k = \omega_1$, $\delta \Omega(s) = \Omega(s) / \omega_1$.

Передатну функцію (18) уточнено на основі аналізу отриманих нелінійних залежностей для кута повороту фазової траєкторії:

$$W_{\theta}^{\Omega}(s) = \frac{\theta(s)}{\delta \Omega(s)} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{4g_2 \zeta \delta k}{\sqrt{\delta k^4 - 2(1 - 2\zeta^2)\delta k^2 + 1}} \right] \frac{\zeta k \delta k}{s + \zeta k \delta k}. \quad (19)$$

У випадку чутливого елемента із співпадаючими парціальними частотами

$$W_{\Omega}^{\theta}(s) = \frac{\theta(s)}{\delta \Omega(s)} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{4g_2}{\sqrt{2}} \right] \frac{\zeta k}{s + \zeta k}. \quad (20)$$

Результати числового моделювання перехідного процесу по куту θ повороту траєкторії від ступінчастої кутової швидкості показані на рис. 6.

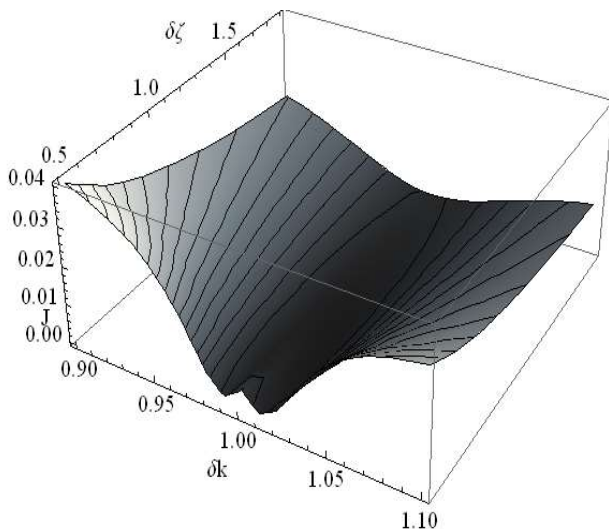


Рис. 5. Інтегральна похибка представлення перехідного процесу

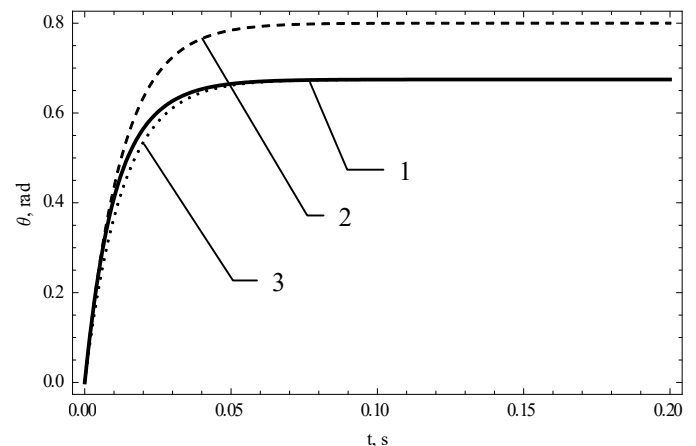


Рис. 6. Моделювання перехідного процесу (1 – числове моделювання, 2 – спрощена апроксимація, 3 – покращена апроксимація)

Таким чином, отримана математична модель руху чутливого елемента коріолісових вібраційних гіроскопів у вигляді передатних функцій, де кутова швидкість є входом лінійної динамічної системи.

Простота отриманих моделей дозволяє ефективно обчислювати і оптимізувати головні вимірювальні характеристики коріолісових вібраційних гіроскопів та синтезувати системи фільтрації і керування, використовуючи традиційні методології для систем автоматичного керування і обробки сигналів.

В результаті були отримані узагальнені рівняння руху чутливих елементів для змінної кутової швидкості в термінах комплексних амплітуд, узагальнена комплексна передатна функція коріолісових вібраційних гіроскопів від кутової швидкості до амплітуди вторинних коливань, вирази для розрахунку амплітудно та фазо-частотних характеристик від гармонічної кутової швидкості, отримано умови стійкості коливань чутливого елемента та оптимальності перехідного процесу в демодульованих сигналах, отримано спрощену дійсну передатну функцію коріолісових вібраційних гіроскопів та оцінено точність апроксимації нею повних передатних функцій, отримано вирази для точної та наближеної передатних функцій кута повороту фазової траєкторії руху чутливого елемента від кутової швидкості.

Розділ 5 присвячений розробці методів проектування чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів.

Отриманий вираз для розрахунку сил, які діють на чутливий елемент і створюються за допомогою електростатичного гребінчастого двигуна (рис. 7) із врахуванням нелінійної ємності:

$$F_x = \frac{nHV^2 \epsilon \epsilon_0}{2} [(a_0 + a_1 x)(\delta V - \sin(\omega t + \varphi))^2 - (a_0 - a_1 x)(\delta V - \sin(\omega t))^2] \quad (21)$$

Тут V є амплітудою гармонічної напруги, прикладеної до статорів (нерухомі частини) гребінчастого приводу, δV є відношенням напруги, прикладеної до рухомої частини приводу до V , n є повною кількістю гребінок в гребінчастому приводі, H , a_0 та a_1 є сталими конструктивними параметрами гребінчастого двигуна.

На основі аналізу ефективності роботи гребінчастого двигуна в залежності від фазового зсуву збудження φ та відносної напруги рухомої частини δV , яку графічно показано на рис. 8, вперше було отримано умови для забезпечення режимів його оптимальної роботи:

$$\begin{aligned} \varphi &= \arccos(-4\delta V^2), (\delta V < \frac{1}{2}), \\ \varphi &= \pi, (\delta V \geq \frac{1}{2}), \\ \varphi &= \frac{\pi}{2}, (\delta V = 0). \end{aligned} \quad (22)$$

Найбільш важливими є режими з нульовою напругою на рухомій частині, та коли напруга на ній більше ніж половина від амплітуди напруги збудження. При цих режимах сила (21), яка діє на чутливий елемент, буде

$$F_x = nHV^2 \epsilon \epsilon_0 [2a_0 \delta V \sin(\omega t) + a_1 (\delta V^2 + \sin^2(\omega t))x], (\delta V \geq \frac{1}{2}), \quad (23)$$

$$F_x = \frac{nHV^2 \varepsilon \varepsilon_0}{2} [a_1 x + a_0 \cos(2\omega t)], \quad (\delta V = 0).$$

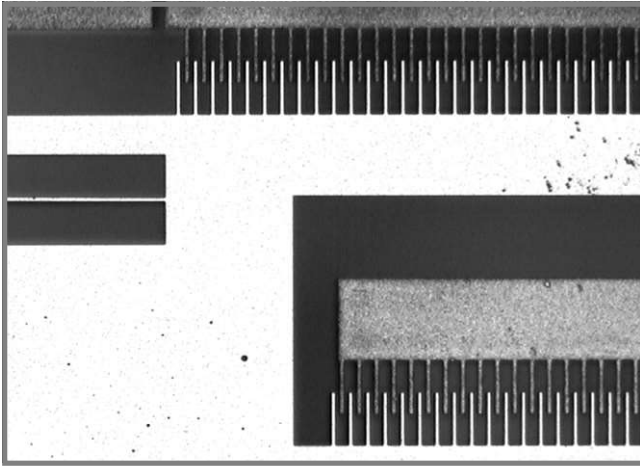


Рис. 7. Гребінчастий двигун мікромеханічного гіроскопа

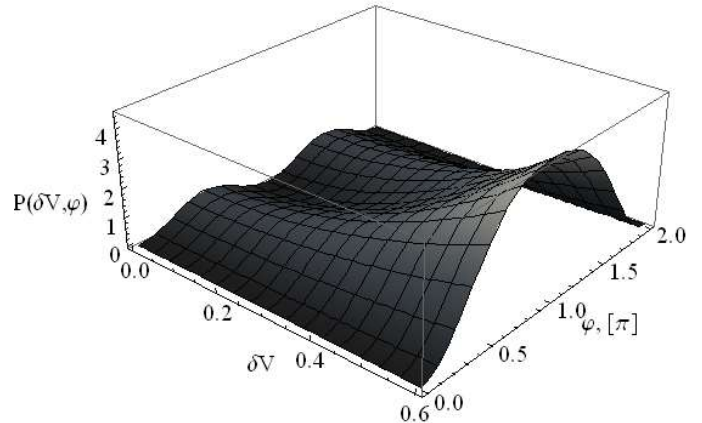


Рис. 8. Ефективність гребінчастого приводу

Важливою особливістю останнього режиму є те, що сила збудження в ньому буде діяти із подвоєною частотою відносно частоти приводної напруги. Це дозволяє розділити частотний діапазон системи збудження і системи детекції вторинних коливань.

Аналіз розробленої математичної моделі гребінчастого двигуна дозволив отримати вирази для розрахунку залежності ефективної парціальної частоти чутливого елемента від частоти збудження. Для «заземленого» режиму ($\delta V = 0$)

$$k_* = \sqrt{k^2 - \frac{nHV^2 \varepsilon \varepsilon_0 a_1}{2m}}. \quad (24)$$

Для режиму $\delta V \geq \frac{1}{2}$ ця ефективна парціальна частота буде

$$k_* = \left[k^2 - \frac{nHV^2 \varepsilon \varepsilon_0 a_1}{m} (\delta V^2 + \sin^2(\omega t)) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (25)$$

На рис. 9 показано експериментально отримані амплітудні характеристики коливальної системи із гребінчастим двигуном при різних напругах зміщення.

Очевидно, що при збільшенні напруги зміщення, власна частота збуджених коливань буде зменшуватися у відповідності до (25). На рис. 10 показано розраховані за (25) значення власної частоти, на які накладено експериментально виміряні власні частоти з рис. 9.

На основі аналізу динаміки чутливого елемента на основі, що обертається, отримані залежності для розрахунку і оптимізації основних вимірювальних характеристик коріолісових вібраційних гіроскопів.

Ідеальний масштабний коефіцієнт можна отримати із виразу (2) для амплітуди вторинних коливань як дотичну до справжньої залежності вторинної амплітуди, взяту при нульовій кутовій швидкості,

$$S_{\Omega} = \left. \frac{\partial A_{20}}{\partial \Omega} \right|_{\Omega \rightarrow 0} = \frac{g_2 q_{10} \delta \omega}{k^3 \sqrt{[(1 - \delta \omega^2)^2 + 4\zeta_1^2 \delta \omega^2] [(\delta k^2 - \delta \omega^2)^2 + 4\zeta_2^2 \delta \omega^2 \delta k^2]}}. \quad (26)$$

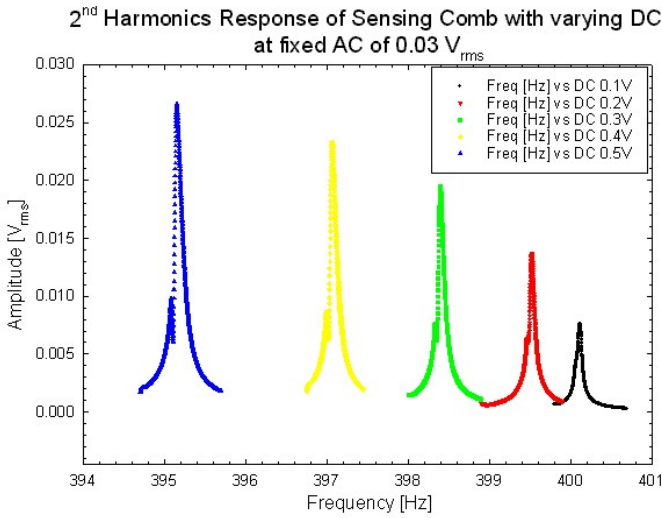


Рис. 9. Амплітудні відгуки при різних напругах зміщення, отримані експериментально

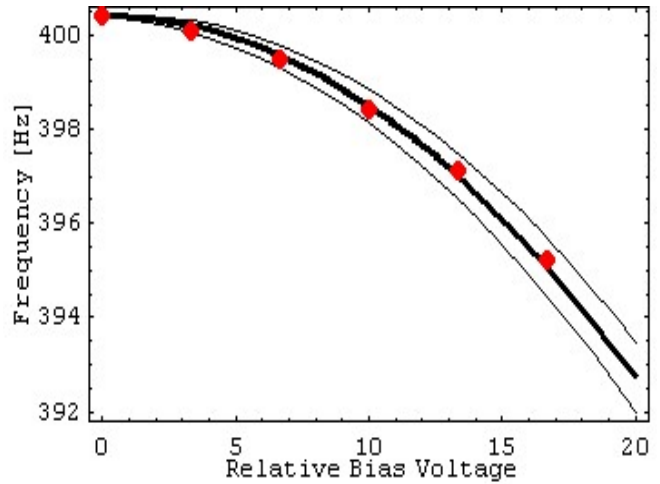


Рис. 10. Резонансна частота (Frequency) як функція відносної напруги зміщення δV (Relative Bias Voltage)

З аналізу (26) випливає, що масштабний коефіцієнт залежить від відношення парціальних частот δk і відносної частоти збудження $\delta \omega$. Залежність масштабного коефіцієнта від цих параметрів показана на рис. 11.

Залежність амплітуди вторинних коливань від відносної кутової швидкості показано на рис. 12.

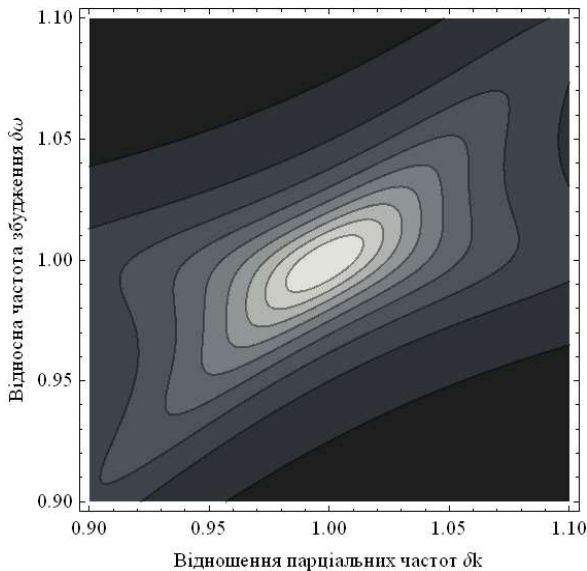


Рис. 11. Масштабний коефіцієнт КВГ як функція конструктивних параметрів

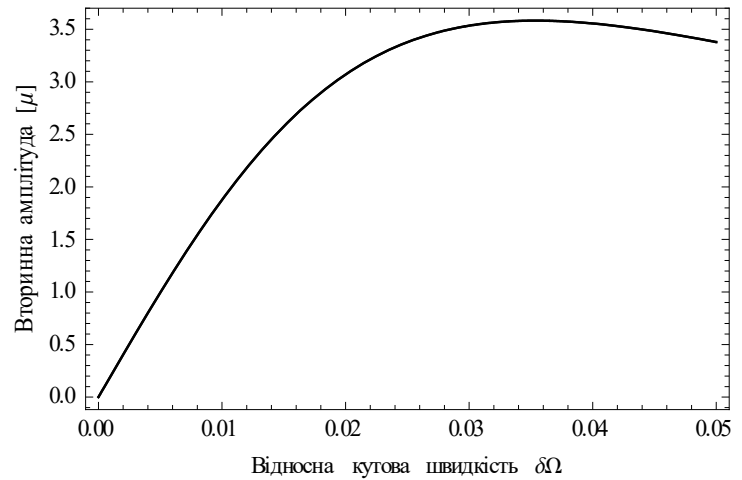


Рис. 12. Вторинна амплітуда для малих кутових швидкостей

На ньому видно, вторинна амплітуда A_{20} близька до того, щоб бути лінійно зв'язаною із кутовою швидкістю, тільки для дуже малих кутових швидкостей ($\delta\Omega \ll 0.05$).

Діапазон кутових швидкостей, в якому масштабний коефіцієнт не буде перевищувати наперед заданий припустимий рівень нелінійності L_0 , можна розрахувати за виразом

$$\delta\Omega^* = \left\{ \frac{L_0 \left[(\delta k^2 - \delta\omega^2)^2 + 4\delta k^2 \delta\omega^2 \zeta_2^2 \right] \cdot \left[(1 - \delta\omega^2)^2 + 4\delta\omega^2 \zeta_1^2 \right]}{(\delta\omega^2 - 1)D_0 + 4\delta\omega^2 \left[g_1 g_2 \delta k \delta\omega^2 \zeta_1 \zeta_2 - d_1 \zeta_1^2 (\delta k^2 - \delta\omega^2) \right]} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (27)$$

$$D_0 = (\delta k^2 - \delta\omega^2) (d_1 + d_2 \delta k^2 - (d_1 + d_2 - g_1 g_2) \delta\omega^2) + 4d_2 \delta k^2 \delta\omega^2 \zeta_2^2.$$

Якщо вибрано допустимий рівень нелінійності разом із необхідним діапазоном вимірювань Ω_{\max} , можна обчислити мінімально можливу первинну парціальну частоту, використовуючи (27), як:

$$k_{\min} = \frac{\Omega_{\max}}{\delta\Omega^*}. \quad (28)$$

Роздільну здатність для коріолісового вібраційного гіроскопа із ємнісною диференційною системою реєстрації вторинних коливань, можна розрахувати за допомогою виразу

$$\Delta\Omega_{\min} = \frac{\Delta C_{\min} k^3 \sqrt{\left((\delta k^2 - \delta\omega^2)^2 + 4\delta k^2 \delta\omega^2 \zeta_2^2 \right) \left((1 - \delta\omega^2)^2 + 4\delta\omega^2 \zeta_1^2 \right)}}{2 \frac{dC(0)}{dx} r_0 g_1 q_2 \delta\omega}. \quad (29)$$

Тут r_0 є відстанню від осі обертання до центру електрода для обертового чутливого елемента і одиницею для поступального чутливого елемента, ΔC_{\min} є мінімальна зміна ємності, яку можливо реєструвати.

Динамічний діапазон для коріолісових вібраційних гіроскопів визначається як

$$R = 20 \log_{10} \frac{\Omega_{\max} - \Delta\Omega_{\min}}{\Delta\Omega_{\min}}, \quad (30)$$

де максимальну кутову швидкість знаходимо із (28). Графічне зображення динамічного діапазону як функції первинної парціальної частоти показано на рис. 13, з якого видно, що чим нижче первинна парціальна частота, тим більшим буде динамічний діапазон коріолісового вібраційного гіроскопа.

Зсув нуля в коріолісових вібраційних гіроскопах може бути результатом дії багатьох факторів. Розглянемо джерела зсуву, які пов'язані з чутливим елементом і його динамікою. Одним із них є вібрація на частоті збудження. Інтерференція вібрацій на інших частотах буде малою і може бути відфільтрованою. Ясно, що для поступальних гіроскопів тільки поступальна вібрація буде мати ефект, а для обертових гіроскопів тільки кутові вібрації будуть доречними. Отже, у випадку вібрацій на робочій частоті, відносна похибка, спричинена вібрацією на частоті збудження, буде

$$\delta A_w = \frac{\sqrt{w_{20}^2 (1 - d_1 \delta\Omega^2 - \delta\omega^2)^2 + \delta\omega^2 (2\zeta_1 w_{20} + g_2 \delta\Omega w_{10})^2}}{g_2 q_1 \delta\omega \delta\Omega}. \quad (31)$$

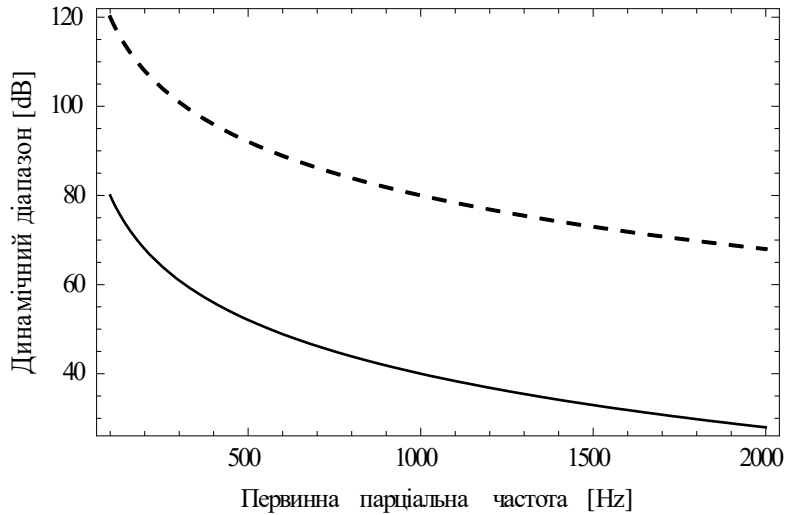


Рис. 13. Динамічний діапазон як функція первинної парціальної частоти (суцільна - $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.025$, пунктирна - $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.0025$, $\delta\omega = \delta k = 1$)

Тут w_{20} є амплітудою гармонічних вібрацій по вторинному руху.

Легко можна довести, що мінімальне значення для похибки (31) досягається при збудженні первинних коливань на їх власній частоті.

Іншим джерелом зсуву нуля є неспівпадіння осі пружності підвісу із віссю вимірювання, що відповідає пружному перехресному зв'язку. Це найбільш типове для гіроскопів з поступальним рухом чутливого елемента. Відносну похибку по амплітуді вторинних коливань від такого неспівпадіння можна розрахувати за виразом

$$\delta A_0 = \frac{A_0}{A_{20}} = \frac{\theta^2 \delta \Delta \omega_2^4}{g_2 \delta \omega^2 \delta \Omega^2}, (\Omega \neq 0). \quad (32)$$

Тут $\Delta \omega_2^4 = (c_2 - c_1)^2 / 4M_2^2$, де c_1 і c_2 є коефіцієнтами жорсткості, що відповідають первинним і вторинним коливанням відповідно, M_2 є коефіцієнтом інерції, що для поступального руху $M_2 = m_2$, а для обертального $M_2 = I_{22}$.

З іншого боку, можна знайти прийнятний допуск для кута неспівпадіння θ_{\max} відносно заданого прийняттого зсуву нуля $\delta \Omega_{\max}$ і за умови відсутності обертання він буде

$$\theta_{\max} = \frac{\delta \Omega_{\max} \delta \omega}{\delta \Delta \omega_2^2}. \quad (33)$$

Розрахунок та оптимізація смуги пропускання оснований на аналізі динамічної похибки вимірювання кутової швидкості. Динамічна похибка коріолісових вібраційних гіроскопів визначається в термінах амплітудного і фазового відгуків (11) на кутову швидкість і може задаватися наступним чином:

$$E_A(\delta\lambda) = \frac{A(\delta\lambda)}{A(0)}, \quad E_\varphi(\delta\lambda) = \frac{\varphi(\delta\lambda)}{\varphi(0)}, \quad (34)$$

де $\delta\lambda = \lambda / \omega_1$ - відносна частота коливань кутової швидкості.

В ідеальному випадку амплітуда і фаза вторинних коливань для гармонічної кутової швидкості повинні бути тими ж самими, як і для постійної, і вирази (34) дорівнюватимуть 1. В разі наявності гармонічної кутової швидкості, амплітудна динамічна похибка має вигляд

$$E_A(\delta\lambda) = \{(\delta\lambda + g_2\delta\omega)[(\delta k^2 - \delta\omega^2)^2 + 4\delta k^2\zeta^2\delta\zeta^2\delta\omega^2]^{1/2} \times \\ \times [(1 - \delta\omega^2)^2 + 4\zeta^2\delta\omega^2]^{1/2}\} / \{g_2\delta\omega[(\delta k^2 - (\delta\lambda + \delta\omega)^2)^2 + \\ + 4\delta k^2\zeta^2\delta\zeta^2(\delta\lambda + \delta\omega)^2]^{1/2} [(1 - (\delta\lambda + \delta\omega)^2)^2 + 4\zeta^2(\delta\lambda + \delta\omega)^2]^{1/2}\} \quad (35)$$

Амплітудна динамічна похибка (35) не залежить явно від первинної парціальної частоти. Максимізація чутливості коріолісового вібраційного гіроскопа вимагає зменшення парціальної частоти первинних коливань k . Забезпечення необхідної смуги частот датчика вимагає утримання амплітудної динамічної похибки (35) якомога ближчою до одиниці у межах цієї смуги частот ($E_A(\delta\lambda) \rightarrow 1$). Графік амплітудної динамічної похибки як функції коефіцієнта демпфування ζ первинних коливань та відносної частоти кутової швидкості показано на рис. 14.

Амплітудна динамічна похибка має два максимуми та один локальний мінімум в напрямку осі частоти кутової швидкості, що ясно видно на рис. 14, які можна обчислити як

$$\delta\lambda_1 = 1 - \delta\omega, \quad \delta\lambda_2 = \sqrt{\frac{1 + \delta k^2}{2}} - \delta\omega, \quad \delta\lambda_3 = \delta k - \delta\omega. \quad (36)$$

Тут перший і третій корені відповідають максимумам, а другий – мінімуму. Оптимізація смуги частот означає надання того ж самого ідеального рівня амплітудної динамічної похибки ($E_A(\delta\lambda) \rightarrow 1$) кожному з трьох екстремумів в околиці заданих (36) частот кутової швидкості.

Для того, щоб забезпечити необхідну смугу частот, відношення парціальних частот повинно вибиратися, базуючись на положенні другого максимуму в амплітудному відгуку:

$$\delta k = \delta\lambda_* + \delta\omega. \quad (37)$$

Тут $\delta\lambda_*$ є потрібна смуга частот в безрозмірній формі, віднесена до парціальної частоти первинних коливань. Оптимізована для $\delta k = 1.05$ амплітудна похибка показана на рис. 15 (оптимальне відношення демпфування $\delta\zeta = 0.921$).

Розглядаючи той факт, що забезпечення необхідного демпфування в КВГ не є легкою задачею, оптимальні значення можна здійснити шляхом створення «електричного демпфування», використовуючи керування із замкненим зворотним зв'язком як для первинних, так і для вторинних коливань.

Для вирішення цих задач і підвищення ефективності проектування чутливих елементів мікроелектроніки коріолісових вібраційних гіроскопів було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для їх автоматизованого проектування MG CAD, головний вид якого показано на рис. 16.

Програма дозволяє не тільки проектувати чутливий елемент із автоматичним розрахунком його характеристик, але і експортувати в основні формати масок, таких як GDSII або CIF, які використовуються для автоматичного виготовлення із використанням сучасних технологій мікроелектроніки.

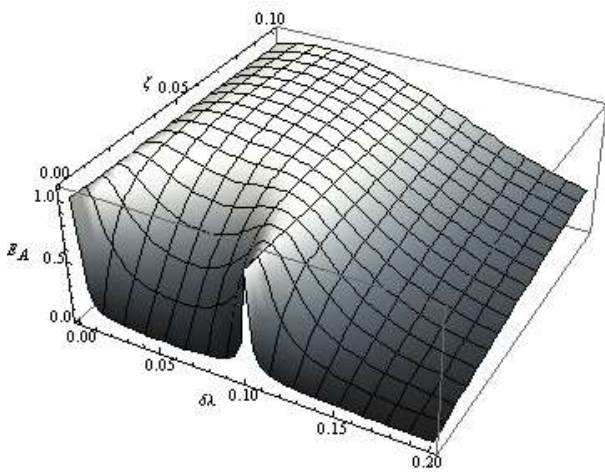


Рис. 14. Амплітудна динамічна похибка
($\delta k = 1.1$, $\delta\omega = 1$, $\delta\zeta = 1$)

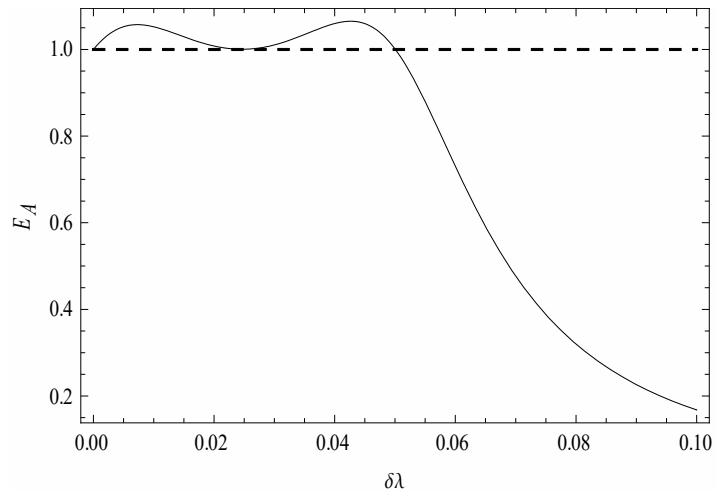


Рис. 15. Оптимізована амплітудна динамічна похибка

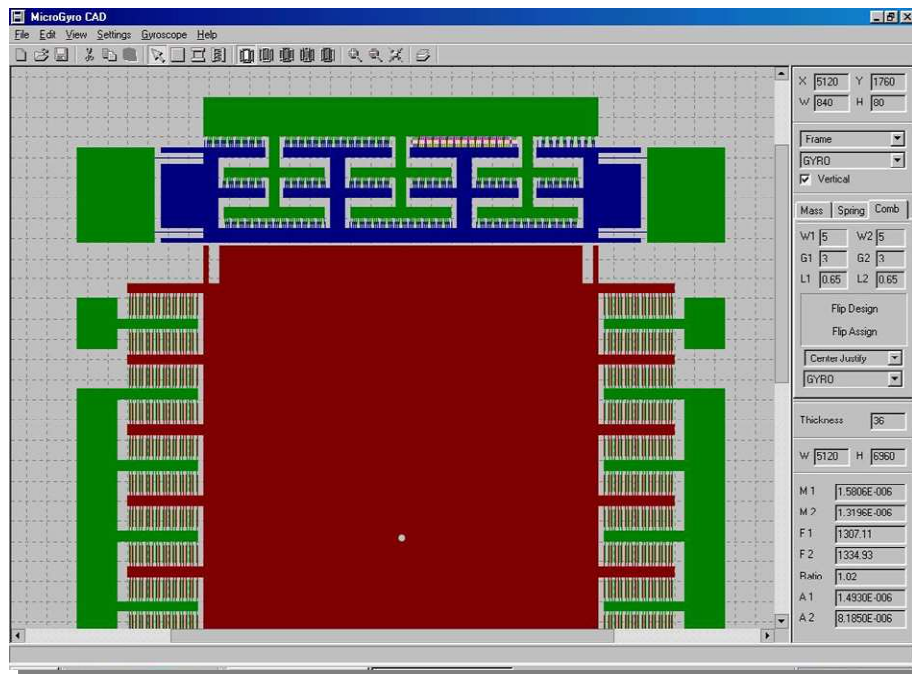


Рис. 16. Головний вид програми проектування чутливих елементів MG CAD

Виготовлений за допомогою цієї програми чутливий елемент показано на рис. 17, а загальний вигляд мікромеханічного коріолісового вібраційного гіроскопа в тестовому корпусі показано на рис. 18.

На рис. 19 показано результати випробувань цього гіроскопа на основі, що обертається. Завдяки використанню режиму збудження з подвійною частотою, кутова швидкість було успішно виміряна навіть без вакуумізації чутливого елемента.

В результаті використання розробленої технології автоматизованого проектування чутливих елементів для мікромеханічних вібраційних гіроскопів, повний цикл від розробки концепції та загального вигляду чутливого елемента до початку його виготовлення може бути виконано в межах одного дня.

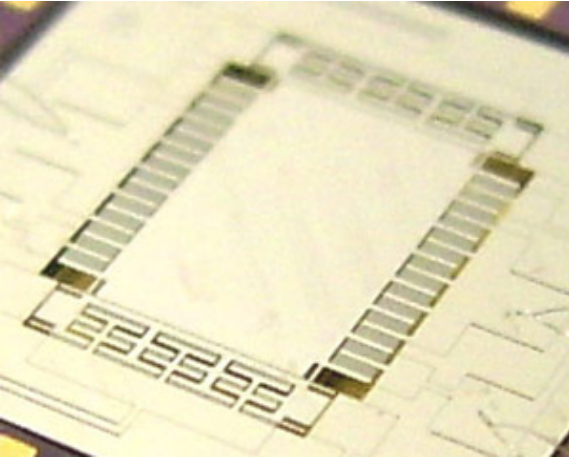


Рис. 17. Загальний вигляд чутливого елемента мікромеханічного КВГ

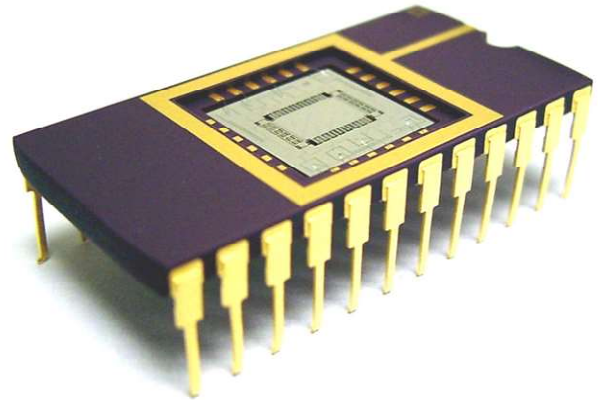


Рис. 18. Чутливий елемент мікромеханічного КВГ в корпусі для тестування

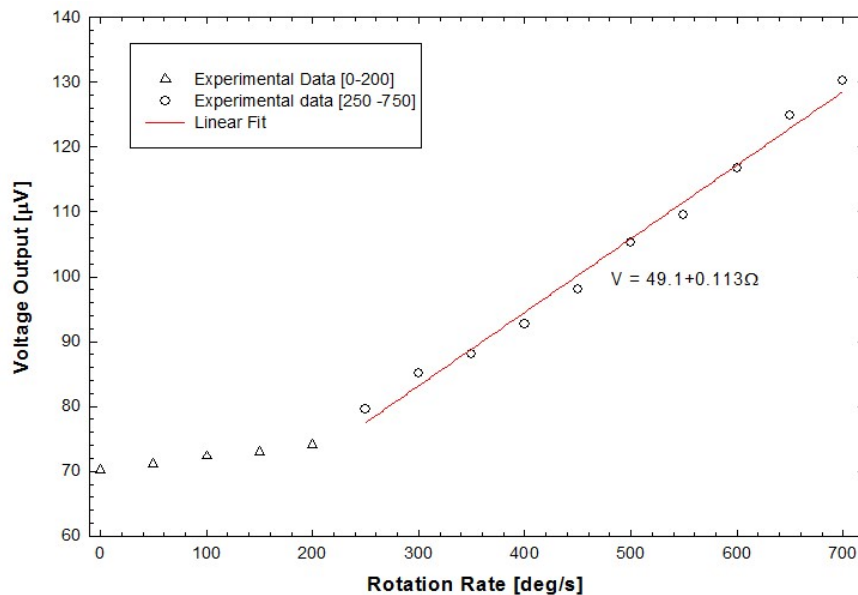


Рис. 19. Залежність вихідної напруги (Voltage Output) від кутової швидкості (Rotation Rate) по результатам випробувань

Таким чином отримані вирази для розрахунку сил, які діють на чутливий елемент і створюються за допомогою електростатичного гребінчастого двигуна із врахуванням нелінійної ємності, вирази для розрахунку залежності парціальної частоти чутливого елемента від частоти збудження, режими збудження первинних коливань чутливого елемента з максимальною ефективністю, вирази для розрахунку масштабного коефіцієнта коріолісових вібраційних гіроскопів та модель похибки від його нелінійності, метод розрахунку мінімальної робочої частоти коріолісового вібраційного гіроскопа за заданою прийнятною нелінійністю, вираз для розрахунку роздільної здатності для ємнісної системи реєстрації вторинних коливань, вираз для розрахунку динамічного діапазону коріолісового вібраційного гіроскопа, вирази для зсуву нуля від зовнішніх вібрацій та неспівпадіння пружних та вимірювальних вісей та методика мінімізації цих похибок, метод розрахунку кута неспівпадіння пружних і вимірювальних вісей для його подальшої компенсації, вирази для

розрахунку амплітудної та фазової динамічних похибок, вираз для розрахунку смуги пропускання коріолісових вібраційних гіроскопів, метод вибору відношення парціальних частот та коефіцієнтів демпфування для забезпечення заданої смуги пропускання, алгоритми та програмне забезпечення для ефективного проектування чутливих елементів мікромеханічних коріолісових вібраційних гіроскопів, що значно зменшують час на їх розробку.

Розділ 6 присвячений розробці та дослідженню методів і алгоритмів обробки сигналів, які спрямовані на покращення вимірювальних характеристик коріолісових вібраційних гіроскопів.

В роботі синтезовано статичні фільтри стохастичних шумів вимірювання, приєднані до виходу системи КВГ, як показано на рис. 20.

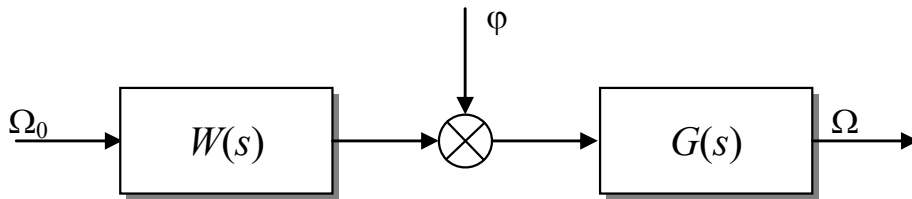


Рис. 20. Статична фільтрація шуму датчика

У випадку, якщо шум φ є білим, а кутова швидкість характеризується низькочастотною спектральною щільністю

$$S_{\Omega}(s) = \frac{\sigma^2 B^2}{B^2 - s^2}, \quad (38)$$

де B є частота зрізу рухомого об'єкту, а σ є стандартним відхиленням кутової швидкості, то передатна функція оптимального фільтра, синтезованого за методом Вінера, буде

$$G(s) = [B\sqrt{1 + \gamma^2} (s + \zeta k)] / [\gamma s^2 + s\sqrt{\gamma(B^2 \gamma + \zeta^2 k^2 \gamma + 2\zeta k B \sqrt{1 + \gamma^2})} + \zeta k B \sqrt{1 + \gamma^2}]. \quad (39)$$

Якщо шум є високочастотним та комплементарним до діапазону частот кутових швидкостей, то передатна функцію для оптимального статичного фільтра шумів вимірювання буде

$$G(s) = \frac{B(s + \zeta k)}{s^2 \gamma + s\sqrt{\zeta k \gamma (2B + \zeta k \gamma)} + B \zeta k}. \quad (40)$$

Результати числових моделювань фільтрації «білого» шуму датчика на основі повної математичної моделі показані на рис. 21.

В той час, як шуми вимірювання можуть бути ефективно видалено за допомогою як статичної, так і динамічної оптимальної фільтрації, усунення стохастичних збурень, або збурень, які подібні до вимірюваної кутової швидкості, є більш важкою задачею. Єдиним шляхом для відокремлення виходу від кутової швидкості від виходу, спричиненого збуреннями ψ , є прийняття до уваги додаткової інформації про кутову швидкість і збурення, та їх спектральних щільностей.

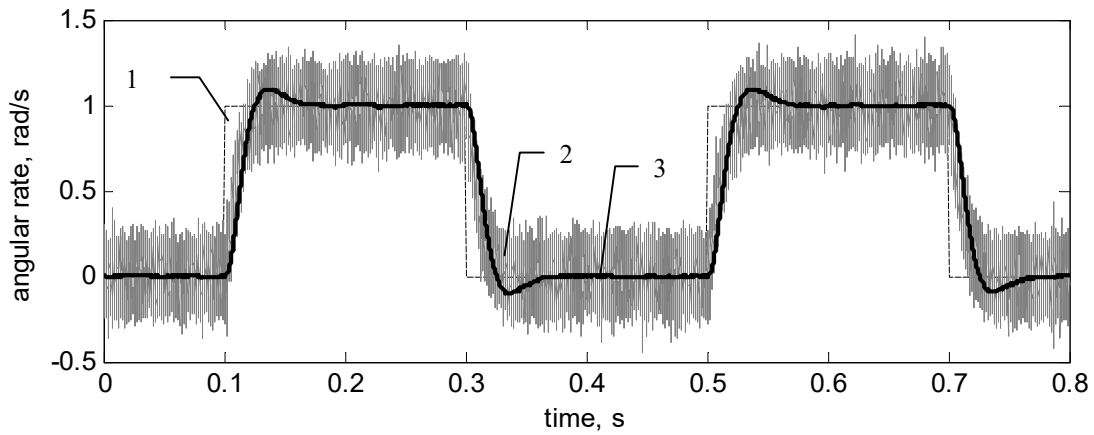


Рис. 21. Числове моделювання фільтрації шуму датчика (1 – вхідна кутова швидкість, 2 – зашумлений вихід, 3 – фільтрований вихід)

Збурення діють на КВГ тим же шляхом, що і невідома кутова швидкість, що робить їх по суті невідрізнюваними від неї (рис. 22).

Для кутової швидкості зі спектральною щільністю (38), оптимальними фільтрами для збурень у вигляді білого шуму, отриманий за методом Вінера, буде мати передатну функцію

$$G(s) = \frac{B\sqrt{1+\gamma^2}(s+\zeta k)}{\zeta k(\gamma s + B\sqrt{1+\gamma^2})}. \quad (41)$$

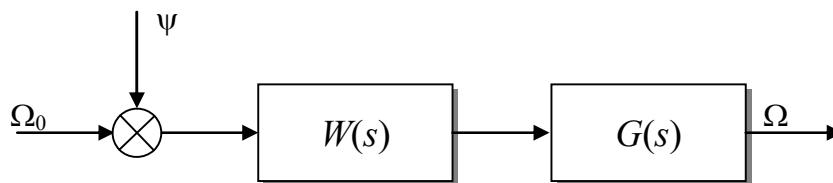


Рис. 22. КВГ з доданими «схожими на швидкість» збуреннями

У випадку високочастотних комплементарних збурень оптимальний статичний фільтр буде

$$G(s) = \frac{B(s+\zeta k)}{\zeta k(B+\gamma s)}. \quad (42)$$

Результати числових моделювань фільтра (41) у випадку збурень у вигляді білого шуму і постійної кутової швидкості показані на рис. 23.

Геометричні недосконалості у віброуючих механічних структурах і/або чутливих і приводних електродах як і електричний зв'язок між цими електродами можуть спричинити вихідний сигнал за відсутності обертання. Через ці проблеми дуже бажаним для коріолісових вібраційних гіроскопів є розвиток ефективної системи віддалення таких перехресних зв'язків.

Для розв'язання проблеми компенсації небажаного перехресного зв'язку розроблено структуру контуру компенсації (рис. 24) та ідентифіковано його передатні функції.

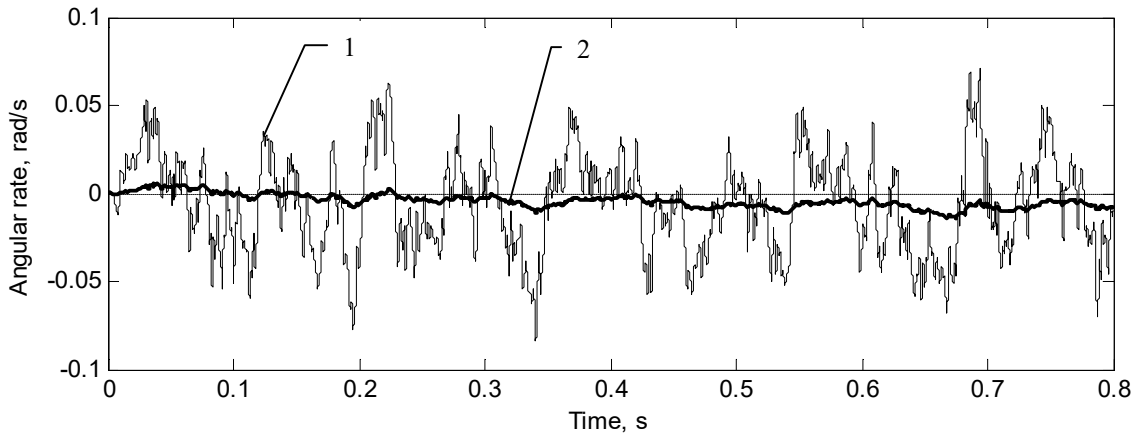


Рис. 23. Моделювання фільтрації збурень
(1 – нефільтрований сигнал, 2 – фільтрований)

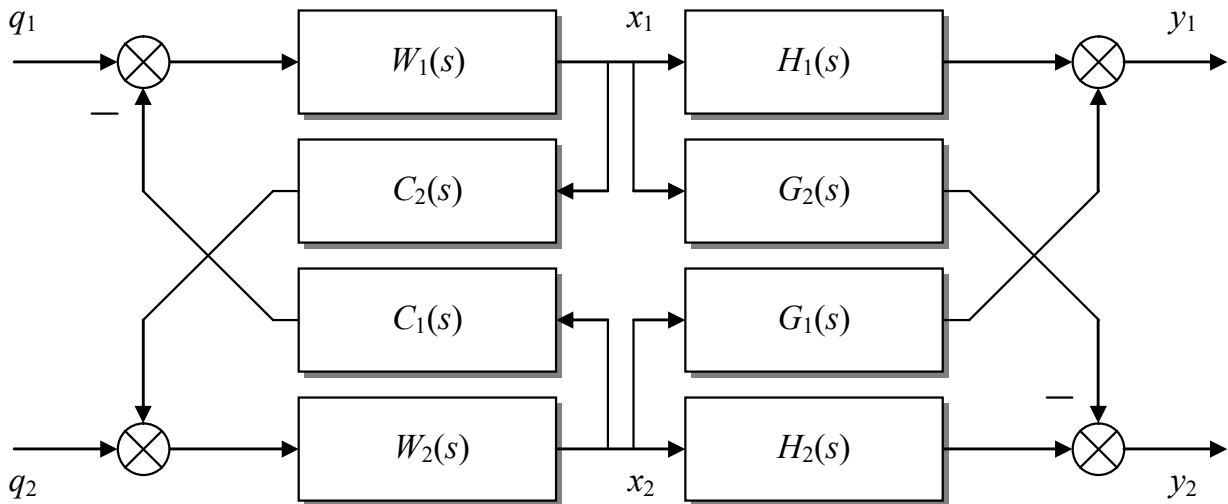


Рис. 24. КВГ із доданою розв'язуючою структурою

Передатні функції чутливого елемента коріолісового вібраційного гіроскопа в для модульованих сигналів мають вигляд

$$W_1(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta_1\omega_1s + \omega_1^2}, \quad W_2(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2s + \omega_2^2}, \quad (43)$$

$$C_1(s) = (g_1\Omega + d_{12})s + c_{12}, \quad C_2(s) = (g_2\Omega + d_{21})s + c_{21}.$$

Тут d_{12} і d_{21} є небажаними коефіцієнтами перехресного демпфування, c_{12} і c_{21} є небажаними коефіцієнтами перехресної жорсткості. Ці коефіцієнти перехресного зв'язку повинні бути скомпенсованими, тоді як коріолісовий член із кутовою швидкістю повинен бути збережений.

Синтезовані передатні функції розв'язуючої структури

$$G_1(s) = \frac{c_{12} + d_{12}s}{s^2 + 2\zeta_1\omega_1s + \omega_1^2}, \quad G_2(s) = \frac{c_{21} + d_{21}s}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2s + \omega_2^2}, \quad (44)$$

$$H_1(s) = 1 + \frac{g_1 s(c_{21} + d_{21} s)}{(s^2 + 2\zeta_1 \omega_1 s + \omega_1^2)(s^2 + 2\zeta_2 \omega_2 s + \omega_2^2)} \Omega,$$

$$H_2(s) = 1 + \frac{g_2 s(c_{12} + d_{12} s)}{(s^2 + 2\zeta_1 \omega_1 s + \omega_1^2)(s^2 + 2\zeta_2 \omega_2 s + \omega_2^2)} \Omega.$$

Однак, можна відмітити, що передатні функції (44) залежать від невідомої кутової швидкості Ω , що вимагає здійснення декількох додаткових кроків для того, щоб зробити розв'язуючу систему життєздатною.

Приймаючи до розгляду той факт, що вторинні коливання зазвичай є суттєво меншими за первинні, є виправданим припустити, що вплив вторинних коливань на первинні є настільки малим, що не береться до уваги. Крім того, тільки вихід вторинних коливань використовується для вимірювання кутової швидкості. Отже, розв'язуючу систему можна спростити, як показано на рис. 25.

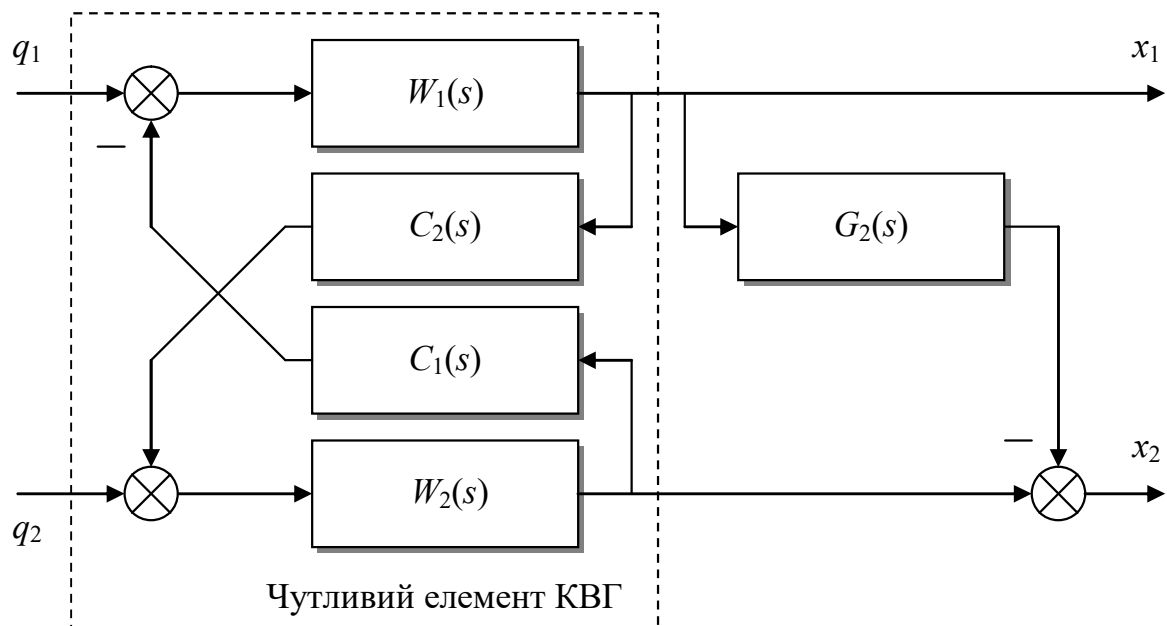


Рис. 25. КВГ із частковою розв'язуючою системою

В цій системі первинні коливання реєструються та після обробки передатною функцією G_2 віднімаються від вторинних коливань, частково компенсуючи вплив небажаних перехресних зв'язків.

Хоча розглянуте вище система часткового розв'язування до деякої міри звільняє КВГ від небажаних зв'язків, це не є достатнім для високоякісних приладів. В той же час, система повного розв'язування, що базується на передатних функціях (44) не є здійсненою через наявність невідомої кутової швидкості як коефіцієнту в її передатних функціях.

Проте в виразах (44) кутова швидкість присутня тільки як додатковий вхід до розв'язуючої системи. Така особливість дозволяє побудувати розв'язуючу систему шляхом подавання розв'язаної кутової швидкості назад до розв'язуючої системи, як показано на рис. 26.

Результати числового моделювання роботи цих систем показано на рис. 27.

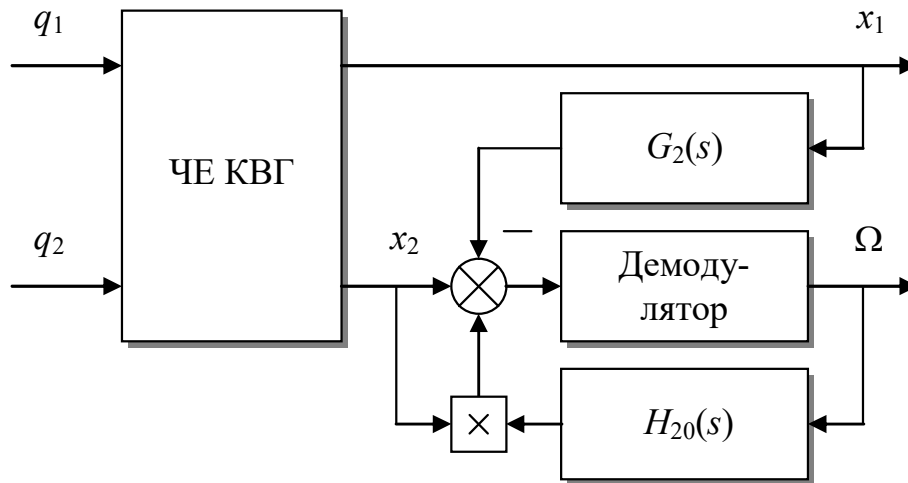


Рис. 26. Лінеаризована система повного розв'язування сигналів

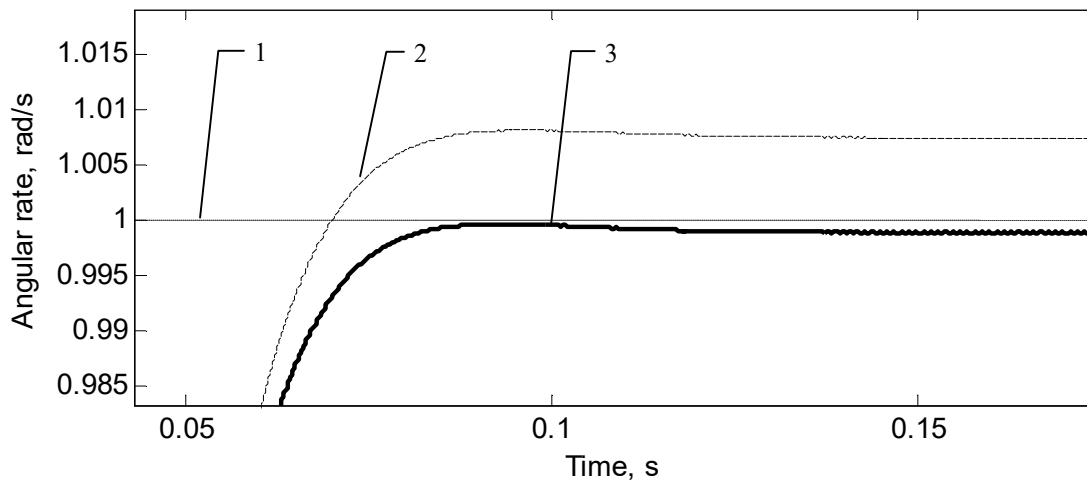


Рис. 27. Порівняння якості розв'язуючих систем

(1 – вхідна кутова швидкість, 2 – часткова система розв'язування, 3 – повна лінеаризована система)

Одними із головних джерел зсуву нуля в КВГ є зміни температури. Зміни температури викликають зсув нуля через перехресне псевдо-демпфування, яке залежить від температури.

В цьому випадку збуджені первинні коливання чутливого елемента здатні спричинити вторинні (вихідні) коливання навіть без зовнішнього обертання, прикладеного до датчика.

В дисертації отримано наступну передатну функцію від перехресного псевдо-демпфування ζ_{12} , яке залежить від температури, до спричиненої ним хибної кутової швидкості:

$$W_{\Omega}^{\zeta}(s) = \frac{\Omega^{\zeta}(s)}{\zeta_{12}(s)} = \frac{2\omega_2(\omega_2^2 - \omega^2 + 2j\omega_2\omega\zeta_2)}{g_2(\omega_2^2 - \omega^2 + 2\omega_2\zeta_2s + 2j\omega(s + \omega_2\zeta_2))}. \quad (45)$$

Передатну функцію (45) можна спростити, застосовуючи припущення, що парціальні частоти є рівними ($\omega_1 = \omega_2 = k$), як і відносні коефіцієнти демпфування ($\zeta_1 = \zeta_2 = \zeta$), і частота збудження первинних коливань є $\omega = k\sqrt{1 - 2\zeta^2}$:

$$W_{\Omega}^{\zeta}(s) = \frac{2k^2\zeta}{g_2(s + k\zeta)}. \quad (46)$$

Припускаючи, що коефіцієнт перехресного демпфування є функцією температурного зсуву T від температури калібрування, він може бути апроксимований, застосовуючи поліном

$$\zeta_{12} = \zeta_{12}(T) \approx \sum_{i=0}^n \zeta_i^T T^i. \quad (47)$$

Пов'язані із температурою коефіцієнти ζ_i^T можна визначити експериментально, коли відома (виміряна) навколишня температура і кутова швидкість відсутня. Однак, у більшості випадків ми спостерігаємо кутову швидкість як вихід гіроскопа. Для того, щоб зв'язати кутову швидкість з вхідним перехресним демпфуванням, застосуємо усталений стан передатної функції (46) як

$$\Omega(T) = W_{\Omega}^{\zeta}(s \rightarrow 0)\zeta_{12}(T) \approx \frac{2k}{g_2} \sum_{i=0}^n \zeta_i^T T^i = \sum_{i=0}^n \Omega_i^T T^i. \quad (48)$$

Для того, щоб успішно справлятися з перехідними процесами в динаміці чутливого елемента коріолісового вібраційного гіроскопа через зміни температури, систему компенсації температури можна синтезувати за допомогою розробленої раніше системи компенсації перехресного зв'язку (рис. 25), компенсуюча передатна функція якої

$$G_2(s) = \frac{2\zeta_{12}\omega_1 s}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2 s + \omega_2^2}. \quad (49)$$

Тут ζ_{12} є залежним від температури коефіцієнтом перехресного демпфування, заданим (47). Беручи температурні виміри з температурного датчика, можна тепер об'єднати ці показання з вимірними первинними коливаннями для компенсації температурних похибок на низькому рівні (до демодуляції). Результати числового моделювання роботи системи температурної компенсації показано на рис. 28.

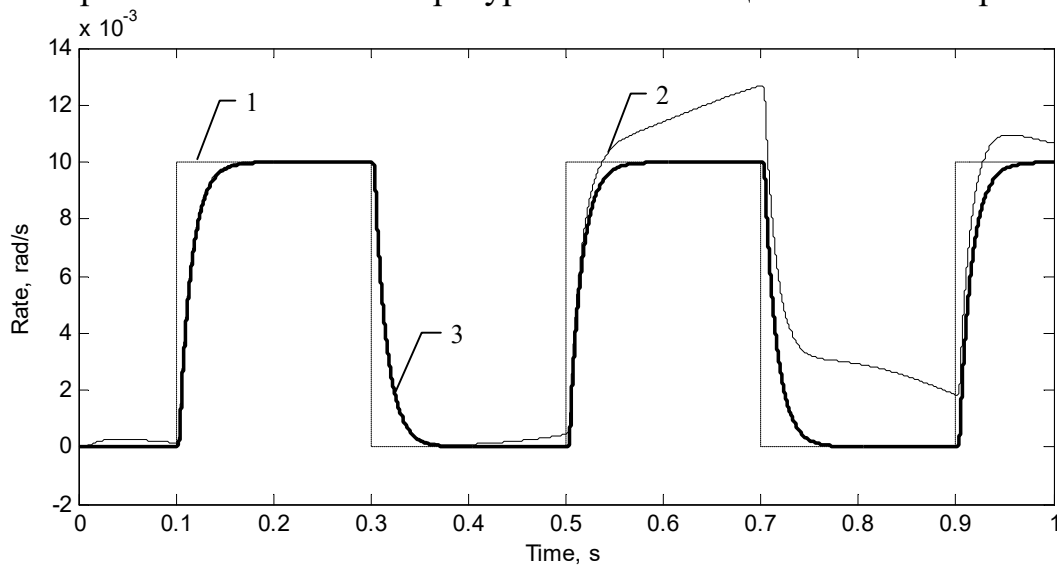


Рис. 28. Моделювання системи температурної компенсації (1 – вхідна кутова швидкість, 2 – некомпенсований вихід, 3 – компенсований вихід)

В разі якщо вимірювання температури для подальшої компенсації не є можливим, в роботі запропоновано метод статистичної фільтрації температурних збурень, який базується на розробленому раніше алгоритмі статичної фільтрації стохастичних збурень. Отримана за методом Вінера передатна функція оптимального фільтра буде

$$G(s) = \frac{2Bk\gamma(k\zeta + s)}{k\zeta(2Bk\gamma + s\sqrt{g_2^2 B^2 + 4k^2 \gamma^2})}. \quad (50)$$

Кутова швидкість була прийнята низькочастотним стохастичним процесом з частотою зрізу B , а температура представлена моделлю повільного дрейфу.

Таким чином, в роботі були отримані передатні функції статичних фільтрів стохастичних шумів вимірювання, передатні функції статичних фільтрів стохастичних збурень, параметри дискретного фільтра Калмана для фільтрації стохастичних шумів вимірювання, метод синтезу систем компенсації небажаних перехресних зв'язків та перехресної чутливості коріолісових вібраційних гіроскопів, структура і передатні функції лінеаризованої системи часткової компенсації небажаних перехресних зв'язків коріолісових вібраційних гіроскопів в модульованих сигналах, структура і передатні функції нелінійної системи повної компенсації небажаних перехресних зв'язків, структура і передатні функції системи компенсації перехресної чутливості динамічно настроюваних гіроскопів, передатна функція температурної похибки вимірювання кутової швидкості, структура і передатна функція системи компенсації температурних похибок для температури, яка спостерігається, а також передатна функція оптимального фільтру температурних похибок у випадку стохастичної температури, яка не спостерігається.

Розділ 7 присвячений різним аспектам синтезу замкнутих систем керування чутливим елементом коріолісових вібраційних гіроскопів.

Для того, щоб ефективно проводити рекурентну ідентифікацію параметрів гіроскопів та синтезувати системи керування для реалізації різних режимів роботи, в цьому розділі було розглянуто представлення динаміки чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів в просторі станів, для яких знайдено вирази для всіх необхідних параметрів.

Отриману математичну модель в просторі станів було використано для порівняльного аналізу ефективності роботи таких алгоритмів рекурентної ідентифікації, як ARX, ARMAX, Бокс-Дженкінса, в запропонованій в роботі схемі рекурентної ідентифікації, яку показано на рис. 29.

На основі проведеного аналізу було зроблено висновок, що у випадку великого рівня шумів вимірювання кутової швидкості алгоритм ARMAX дає найкращі результати, тоді як у випадку малих шумів може з успіхом застосовуватись алгоритм Бокса-Дженкінса.

Необхідність вимірювати кут обертання замість кутової швидкості, або режим інтегруючого гіроскопа, призводить до особливим чином сконструйованих чутливих елементів, які поводять себе подібно до маятника Фуко. В роботі розглянуто інший підхід, коли звичайний КВГ, що вимірює кутову швидкість, доповнюється

регулятором зворотного зв'язку, який забезпечує подібну до інтегруючого гіроскопа роботу, в той же час утримуючи вихідні вторинні коливання чутливого елемента.

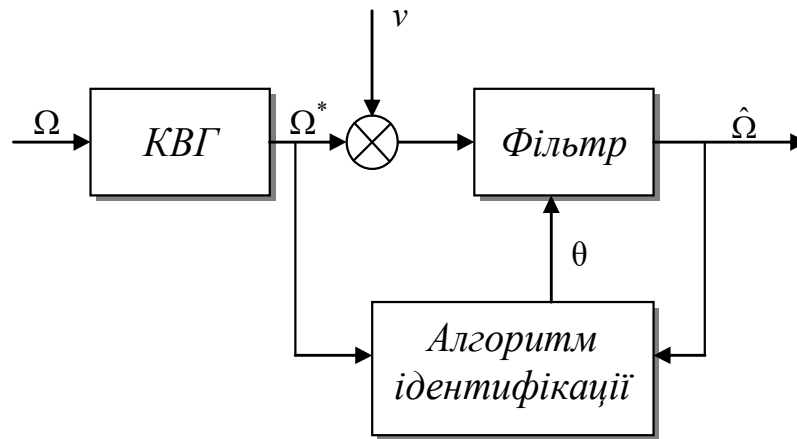


Рис. 29. Схема ідентифікації параметрів КВГ

У термінах демодульованих сигналів, КВГ разом із від'ємним контуром зворотного зв'язку може бути представленим у вигляді системи керування, показаної на рис. 30.

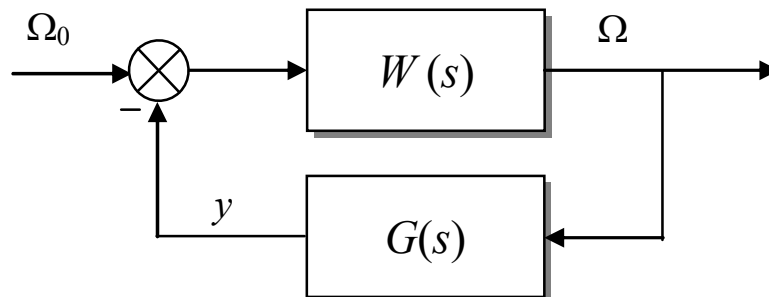


Рис. 30. КВГ з регулятором зворотного зв'язку

Тут Ω - дійсний вихід гіроскопа (виміряна кутова швидкість), Ω_0 - невідома кутова швидкість (вхід системи), а $W(s)$ є передатною функцією КВГ, заданою (16).

Для реалізації режиму інтегруючого гіроскопа в роботі отримана наступна передатна функція контуру зворотного зв'язку:

$$G(s) = \frac{\zeta k + s}{\zeta k(s - 1)}. \quad (51)$$

Важливо, що передатна функція (51) виведена в термінах демодульованих оригінальних сигналів, і для того, щоб використати її вихід в якості збудження до вторинної коливальної ланки чутливого елемента (прискорення q_2), він повинен бути модульованим з диференційованим виходом первинних коливань, щоб зробити його ідентичним до коріолісової сили, "діючої" вздовж координати вторинного руху:

$$q_2(t) = g_2 \cdot y(t) \cdot \dot{x}_1(t). \quad (52)$$

Подання сигналу (52) на чутливий елемент по напрямку вторинного руху призводить до зменшення його переміщень, в той час як вихід y зворотного зв'язку

стає новим виходом гіроскопа, який реалізує бажаний режим роботи. Рис. 31 та рис. 32 демонструють результати числового моделювання роботи гіроскопа в режимі інтегруючого.

Отриманий регулятор (51) зменшує відхилення чутливого елемента, а також вплив шуму вимірювань на вихідний кут повороту.

Оскільки амплітуда вторинних коливань в коріолісових вібраційних гіроскопах прямо пропорційна до вимірюваної кутової швидкості, то конструктивні обмеження на великі відхилення чутливого елемента у напрямку вторинного руху призводять до обмеження діапазону вимірюваних швидкостей. Для того, щоб збільшити діапазон кутових швидкостей, які можна вимірювати коріолісовим вібраційним гіроскопом, зазвичай використовується компенсаційний режим роботи, при якому за допомогою зворотного зв'язку створюється сила (або момент), які зменшують вторинні коливання.

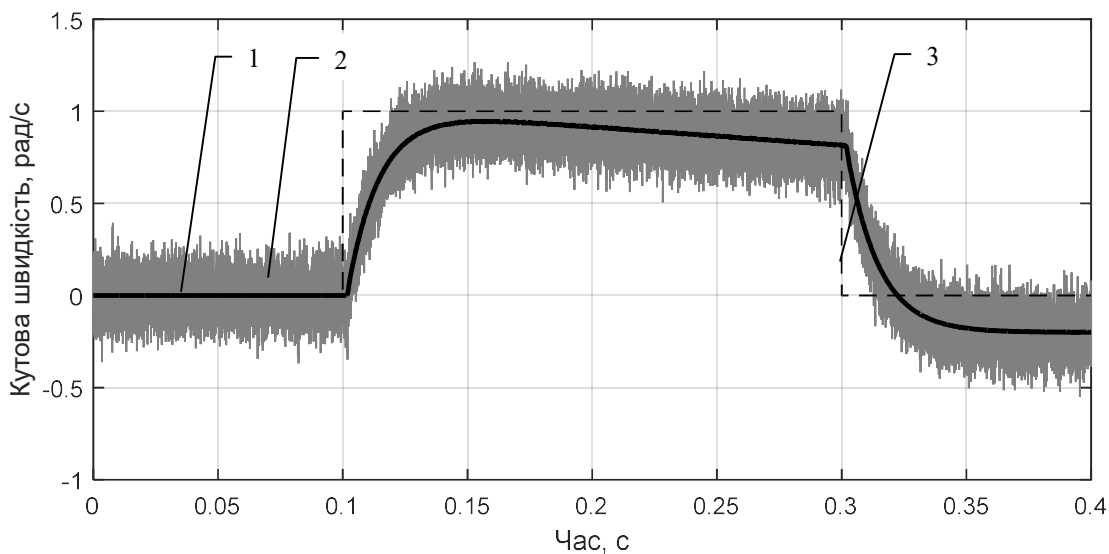


Рис. 31. Сигнали КВГ: 1 – вторинний вихід в режимі компенсації, 2 – зашумлений вторинний вихід, 3 – вхідна кутова швидкість

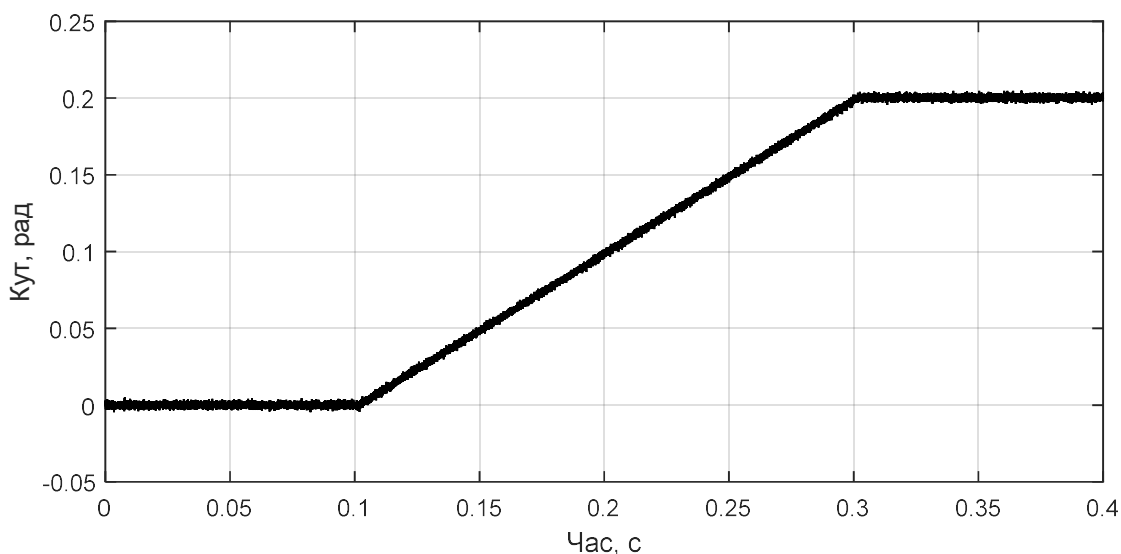


Рис. 32. Інтегрований вихід зворотного зв'язку КВГ

При цьому в якості вихідного сигналу використовується сигнал в цьому контурі зворотного зв'язку.

Для схеми керування із зворотним зв'язком (рис. 28), в роботі було отримано наступну передатну функцію регулятора:

$$G(s) = \lambda \frac{\zeta k + s}{\zeta ks} = \frac{1}{T} \frac{\zeta k + s}{\zeta ks}. \quad (52)$$

Тут $\lambda = 1/T$ є цільовою частотою компенсаційного датчика кутової швидкості на основі коріолісового вібраційного гіроскопа.

Результуючий вихід по вторинним коливанням за відсутності шумів вимірювання показаний на рис. 33, а вихід з контуру зворотного зв'язку на рис. 34.

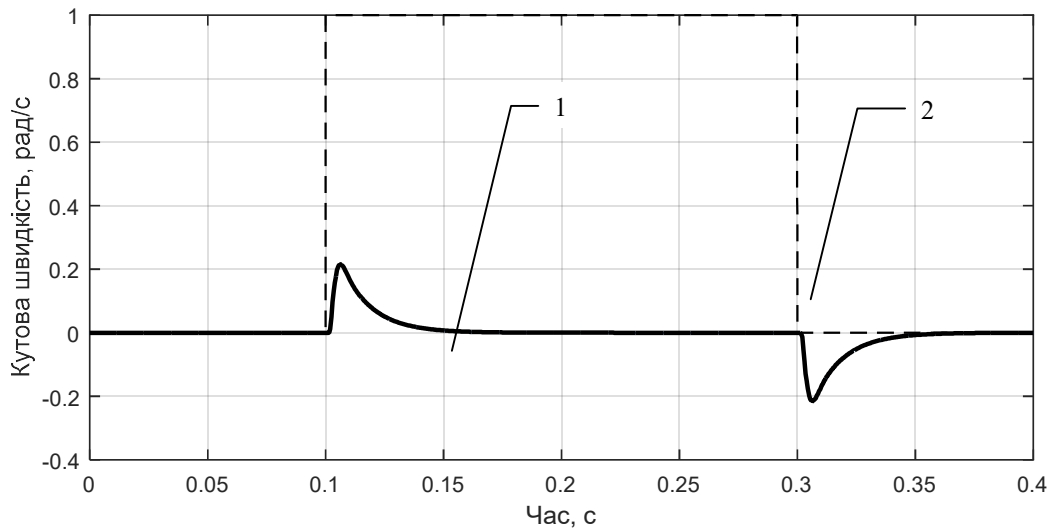


Рис. 33. Сигнали КВГ: 1 – вторинний вихід в режимі компенсації, 2 – вхідна кутова швидкість

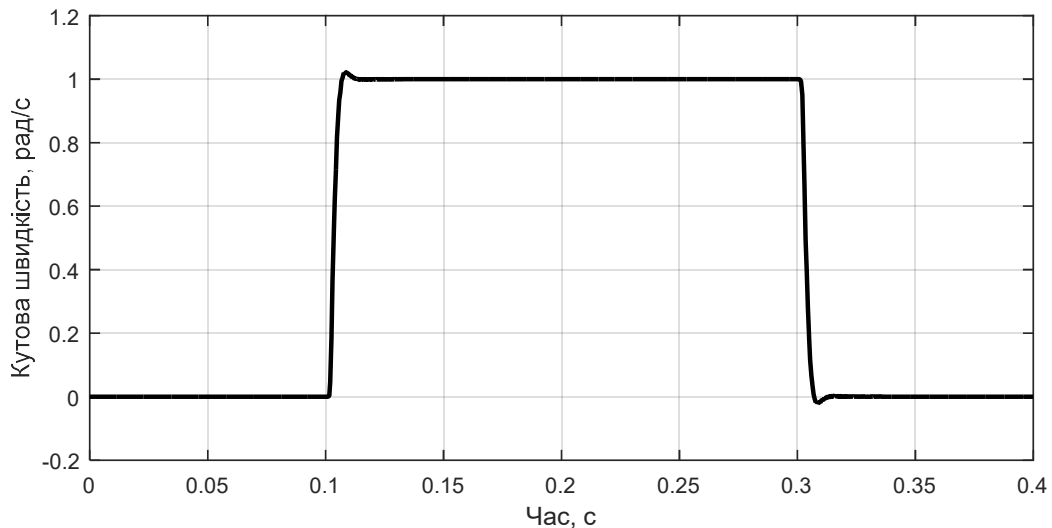


Рис. 34. Результуючий вихід з контуру зворотного зв'язку

Аналіз виходу компенсаційного коріолісового вібраційного гіроскопа при наявності шумів вимірювання показав, що шуми не зменшилися, як у випадку з режимом інтегруючого гіроскопа, і навіть підсилилися. Такий небажаний ефект значно обмежує застосування запропонованого алгоритму компенсації вторинних

коливань. Одним із очевидних способів запобігання такого результату буде використання оптимальних статичних фільтрів шумів вимірювання, синтезованих в розділі 6, які можна розмістити в контурі зворотного зв'язку перед регулятором. Але в цьому випадку якість результуючого перехідного процесу треба оптимізувати із урахуванням роботи фільтру шумів вимірювання.

Таким чином, були отримані узагальнена математична модель динаміки чутливого елемента коріолісового вібраційного гіроскопа в просторі станів, структура системи рекурентної ідентифікації параметрів динаміки чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів, структура і передатна функція системи керування коріолісовим вібраційним гіроскопом в режимі інтегруючого гіроскопа, а також структура і передатна функція системи керування в режимі компенсаційного датчика кутової швидкості.

ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційного дослідження були розвинені і узагальнені теорії коріолісових вібраційних гіроскопів, що дозволило створити на їх основі ефективні методів розрахунку та оптимізації вимірювальних характеристик. Парціальні частоти і коефіцієнти демпфування первинних і вторинних коливань будь якої конструкції чутливого елемента коріолісового вібраційного гіроскопа можуть бути безпосередньо розраховані за бажаними діапазоном лінійного вимірювання, динамічним діапазоном та смугою пропускання. Це дозволяє значно підвищити ефективність процесу розробки з огляду на те, що зникає необхідність використовувати багато ітерацій числового моделювання за методом скінчених елементів, щоб отримати чутливий елемент із бажаними вимірювальними характеристиками. Розробники гіроскопів отримують можливість значно зменшити час, необхідний для створення нових приладів, знизити собівартість і покращити вимірювальні характеристики.

Розроблені в роботі системи статичної оптимальної фільтрації шумів вимірювання і стохастичних збурень, системи компенсації небажаних перехресних зв'язків і температурних похибок, а також системи керування не потребують для своєї роботи додаткових обчислювальних компонентів і можуть бути реалізовані із використанням аналогової елементної бази. Таким чином, отримане в результаті покращення вимірювальних характеристик не потребує перепроектування чутливого елемента і поширює області застосування таких гіроскопів на системи визначення орієнтації та інерціальної навігації. А розробники програмного забезпечення і їх користувачі отримують нові можливості для використання таких датчиків кутової швидкості.

Створене на основі розроблених в роботі методів аналітичного проектування програмне забезпечення для автоматизованого проектування чутливих елементів мікромеханічних коріолісових вібраційних гіроскопів значно зменшили час та собівартість проектування чутливих елементів.

Розроблені в роботі узагальнена теорія коріолісових вібраційних гіроскопів, методи проектування чутливих елементів, програмне забезпечення для автоматизованого проектування, системи фільтрації, керування та компенсації

похибок були успішно впроваджені у виробництві, де продемонстрували свою високу ефективність як з точки зору покращення вимірювальних характеристик, так і значного зменшення часу, необхідного для проектування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ

Публікації в іноземних виданнях:

1. Apostolyuk V. Coriolis Vibratory Gyroscopes: Theory and Design / Vladislav Apostolyuk. – Springer (USA) . – 2015. – 117 p.

2. Apostolyuk V. Efficient design of micromechanical gyroscopes / V. Apostolyuk, V.J. Logeeswaran, F.E.H. Tay // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2002. –Vol. 12. – P. 948-954.

Особистий внесок здобувача: математична модель гіроскопа, вирази для розрахунку вимірювальних характеристик, методологія проектування.

3. Apostolyuk V. Dynamics of Micromechanical Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk, F.E.H. Tay // Sensor Letters. – 2004. –Vol. 2. – No 3-4. – P. 252-259.

Особистий внесок здобувача: математичні моделі чутливих елементів, вирази для розрахунку вимірювальних характеристик.

4. Apostolyuk V. Theory and Design of Micromechanical Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk // MEMS/NEMS Handbook: collection of scientific papers. – Springer (USA) . – 2006. – Vol. 1. – Ch. 6. – P. 173-195.

Статті у наукових фахових виданнях:

5. Апостолюк В.О. Метод синтезу датчика кутової швидкості на динамічно настроюваному гіроскопі / О.В. Збруцький, В.О. Апостолюк, О.С. Апостолюк // Наукові вісті Національного технічного університету України “КПІ”. – 2000. – № 5. – С. 103-109.

Особистий внесок здобувача: метод усунення небажаної перехресної чутливості, структура і передатні функції системи компенсації, числове моделювання.

6. Apostolyuk V. Dynamic Errors of Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk // Механіка гіроскопічних систем.– 2008.– №19.– С.230-239.

7. Apostolyuk V. Transient Process Analysis of Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk, A. Apostolyuk // Механіка гіроскопічних систем.– 2008.– №19.– С.230-239.

Особистий внесок здобувача: математична модель гіроскопа, узагальнена передатна функція, оптимізація перехідного процесу.

8. Apostolyuk V. Optimal Filtering of Stochastic Disturbances for Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk // Інформаційні системи, механіка та керування.– 2009. – №3. – С.20-30.

9. Apostolyuk V. Dynamics of Coriolis Vibratory Gyroscopes in Control Systems / V. Apostolyuk // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2010. – №1(13). – С.62-66.

10. Apostolyuk V. Mathematical Model of Coriolis Vibratory Gyroscopes Motion Trajectory / V. Apostolyuk, I. Gorbunovich // Механіка гіроскопічних систем.– 2010.– №21.– С.5-12.

Особистий внесок здобувача: математична модель фазової траєкторії чутливого елемента, апроксимація параметрів, спрощені наближені вирази і аналіз їх точності.

11. Apostolyuk V. Synthesis of Compensated Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk, Z. Didyk // Proceedings of NAU. – 2010. – №3. – С.55-60.

Особистий внесок здобувача: математична модель гіроскопа в оригінальних, передатна функція гіроскопа.

12. Apostolyuk V. Optimal Sensor Noise Filtering for Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk // Механіка гіроскопічних систем.– 2010.– №22.– С.5-12.

13. Апостолюк В.О. Вплив температури на динаміку коріолісового вібраційного гіроскопа / В.В. Возний, В.О. Апостолюк // Інформаційні системи, механіка та керування.– 2011. – №6. – С.48-56.

Особистий внесок здобувача: математична модель гіроскопа, математична модель впливу температури.

14. Apostolyuk V. Cross-coupling compensation for Coriolis vibratory gyroscopes / V. Apostolyuk // Механіка гіроскопічних систем.– 2011.– №23.– С.5-13.

15. Apostolyuk V. Excitation of Primary Oscillations in Micromechanical Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk // Військово-технічний збірник.– 2011.– №2(5).– С.130-135.

16. Apostolyuk V. Demodulated Kalman Filtering for Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk // Інформаційні системи, механіка та керування.– 2011. – №7. – С.116-125.

17. Apostolyuk V. Temperature Errors Compensation in Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk, V. Chikovani // Механіка гіроскопічних систем.– 2012.– №25.– С. 22-29.

Особистий внесок здобувача: математична модель гіроскопа, структура і передатні функції системи компенсації, числове моделювання.

18. Apostolyuk V. Temperature Error Model in Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk, V. Chikovani // Electronics and Control Systems.– 2012. – №4 (34). – С. 155-158.

Особистий внесок здобувача: математична модель гіроскопа, структура і передатні функції системи компенсації.

19. Apostolyuk V. Demodulated Dynamics and Optimal Noise Filtering for Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk // Військово-технічний збірник.– 2013.– №1(8).– С. 81-88.

20. Apostolyuk V. Dynamics of Trajectory Rotation in Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk // Механіка гіроскопічних систем.– 2013.– №26.– С. 15-21.

Тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій

21. Apostolyuk V. Analytical Design of Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk, V.J. Logeeswaran, F.E.H. Tay // Symposium Gyro Technology: proceedings. – Stuttgart (Germany) . – 2002. – P. 2.1-2.15.

Особистий внесок здобувача: математична модель гіроскопа, вирази для розрахунку вимірювальних характеристик, методологія проектування чутливого елемента.

22. Apostolyuk V. Coriolis Vibratory Gyroscopes in Control Systems / V. Apostolyuk // Авіа-2009: IX міжнародна науково-техн. конф., 2009 р.: збірник доповідей. – К.: НАУ, 2009.– Ч. 2.– С. 9.1-9.4.

23. Apostolyuk V. Demodulated Dynamics and Optimal Filtering for Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk // 17-th St. Petersburg international conference on integrated navigation systems: proceedings. – St. Petersburg (Russia). – 2010. – P. 57-59.

24. Apostolyuk V. Compensation Algorithms for Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk, Z. Didyk // Methods and Systems of Navigation and Motion Control: 1-st international conference, 13-16 October 2010 p.: proceedings. – К.: НАУ, 2010.– С. 124-127.

Особистий внесок здобувача: математична модель гіроскопа в оригінальних, передатна функція гіроскопа.

25. Апостолук В.О. Вплив температури на динаміку коріолісового вібраційного гіроскопа / В.В. Возний, В.О. Апостолук // Гіротехнології, навігація керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки: VIII міжнародна наук. техн. конф., 21-22 квітня 2011 р.: збірник доповідей. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – Ч. 1. – С. 48-51.

Особистий внесок здобувача: математична модель гіроскопа, математична модель впливу температури.

26. Apostolyuk V. Cross-coupling Compensation for Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk, I. Ivanenko // Авіа-2011: X міжнародна науково-технічна конференція, 19-21 квітня 2011 р.: збірник доповідей. – К.: НАУ, 2011.– Том 3.– С. 9.35-9.38.

Особистий внесок здобувача: математична модель гіроскопа в оригінальних, передатна функція гіроскопа.

27. Apostolyuk V. Modelling Trajectory Rotation in Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk // Авіація в XXI сторіччі – Безпека в авіаційних та космічних технологіях: 5-й всесвітній конгрес, 25-27 вересня 2012 р.: збірник доповідей. – К.: НАУ, 2012.– Ч. 2.– С. 33.1-33.8.

28. Apostolyuk V. Modelling Temperature Errors in Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk, V. Chikovani // Methods and Systems of Navigation and Motion Control: 2-nd international conference, 9-12 October 2012: proceedings. – К.: IEEE, 2012.– С. 116-118.

Особистий внесок здобувача: математична модель гіроскопа, структура і передатні функції системи компенсації.

29. Apostolyuk V. Application of Recursive Identification to Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk, O. Apostolyuk // Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки: IX Міжнародна науково-

технічна конференція, 17-18 квітня 2013 р.: збірник доповідей. – К.: НТУУ "КПІ", 2013. – С. 147-151.

Особистий внесок здобувача: схема ідентифікації, порівняльних аналіз алгоритмів.

30. Apostolyuk V. Whole Angle Force Rebalance Control for Coriolis Vibratory Gyroscopes / V. Apostolyuk // Methods and Systems of Navigation and Motion Control: 3-rd international conference, 14-17 October 2014: proceedings. – К.: IEEE, 2014.– С. 69-61.

АНОТАЦІЯ

Апостолюк В.О. Узагальнена теорія та методи проектування коріолісових вібраційних гіроскопів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.03 – Гіроскопи та навігаційні системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена розвитку і узагальненню теорії коріолісових вібраційних гіроскопів, створення на її основі ефективних методів розрахунку та оптимізації вимірювальних характеристик, методів та алгоритмів керування чутливим елементом, компенсації похибок, обробки та фільтрації вихідних сигналів.

В роботі були розвинута та узагальнена теорія чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів, на основі якої дослідити залежності та похибки вимірювальних характеристик від конструктивних параметрів чутливого елемента, прискорень, вібрації, варіацій кутової швидкості та температури. Розроблені методи розрахунку та оптимізації вимірювальних характеристик, а також методи розрахунку конструктивних параметрів чутливих елементів з метою отримання бажаних вимірювальних характеристик.

Також розроблена математична модель коріолісових вібраційних гіроскопів в демодульованих сигналах та отримано структурні схеми і передатні функції для використання їх в системах обробки сигналів та автоматичного керування. Розроблені та досліджені низькорівневі методи компенсації небажаних перехресних зв'язків та перехресної чутливості, методи компенсації похибок вимірювання кутової швидкості.

Розроблені алгоритми та програмне забезпечення для автоматизованого проектування чутливих елементів коріолісових вібраційних гіроскопів, які виготовляються за допомогою технологій мікро-електромеханічних систем, а також системи числового моделювання їх роботи на основі повної математичної моделі в середовищі Сімулінк/Матлаб.

Ключові слова: коріолісовий вібраційний гіроскоп, динаміка, чутливий елемент, метод проектування, похибка вимірювання, обробка сигналів, керування

АННОТАЦИЯ

Апостолюк В.А. Обобщенная теория и методы проектирования кориолисовых вибрационных гироскопов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.03 – Гироскопы и навигационные системы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, 2016.

Диссертационная работа посвящена развитию и обобщению теории кориолисовых вибрационных гироскопов, созданию на её основе эффективных методов расчета и оптимизации измерительных характеристик, методов и алгоритмов управления чувствительным элементом, компенсации погрешностей, обработки и фильтрации выходных сигналов.

В работе была развита и обобщена теория чувствительных элементов кориолисовых вибрационных гироскопов, на основе которой исследованы зависимости и погрешности измерительных характеристик от конструктивных параметров чувствительных элементов, ускорений, вибрации, изменений угловой скорости и температуры. Разработаны методы расчета и оптимизации измерительных характеристик, а также методы расчета конструктивных параметров чувствительных элементов с целью получения требуемых измерительных характеристик.

Кроме этого разработана математическая модель кориолисовых вибрационных гироскопов в демодулированных сигналах и получены структурные схемы и передаточные функции для использования их в системах обработки сигналов и автоматического регулирования. Разработаны и исследованы низкоуровневые методы компенсации нежелательных перекрестных связей и перекрестной чувствительности, методы компенсации погрешностей измерения угловой скорости.

Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для автоматизированного проектирования чувствительных элементов кориолисовых вибрационных гироскопов, которые изготавливаются по технологиям микро-электромеханических систем, а также системы численного моделирования их работы на основе полной математической модели в среде Симулинк/Матлаб.

Ключевые слова: кориолисовый вибрационный гироскоп, динамика чувствительный элемент, метод проектирования, погрешность измерения, обработка сигналов, управление.

ABSTRACT

Apostolyuk V. O. Generalized theory and design methodologies of Coriolis vibratory gyroscopes. – Manuscript.

Dissertation for the Doctor of Engineering Sciences degree in specialty 05.11.03 – Gyroscopes and Navigation Systems. – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2016.

Coriolis vibratory gyroscopes theory was generalized and further developed in this dissertation along with the sensitive element design methodologies. Motion equations for

sensitive elements with linear, rotational, and wave both primary and secondary motions were derived and then generalized to the single system of two differential equations. This system was utilized to analyze sensitive element motions on a rotating basis in terms of amplitudes and phases of primary and secondary motions. Analysis of the sensitive element oscillations stability resulted in expressions for primary and secondary motion eigen frequencies as a functions of the sensitive element parameters and angular rate.

Expressions for calculating scale factor, dynamic range, bias, and bandwidth using design parameters of sensitive element were derived. Angular rate measurement errors caused by scale factor non-linearity, vibrations, measurement and elastic axes misalignment, and angular rate variations were analysed and corresponding techniques for errors reduction and elimination were suggested. Analytical design methodologies, when such sensitive elements parameters as primary and secondary natural frequencies and relative damping factors are calculated directly from the desired main performances, were developed in this dissertation. As a result, high measurement performances of the designed and fabricated sensitive element were achieved and experimentally demonstrated.

Mathematical model of an electrostatic comb-drive, which is used to drive the sensitive element into primary oscillations, incorporating effects from non-linear capacity was developed. Driving efficiency analysis resulted in obtaining conditions for the most efficient excitation modes, one of which implements driving with doubled to driving signal frequency. As a result, efficient frequency separation of noise sources and sensing signals has been achieved. Natural frequency shift from capacity non-linearity was demonstrated both theoretically and experimentally. Comb drive design recommendations that improve its efficiency and implement harmonic excitations were suggested.

Micromachined sensitive element automated design software, which implements these design methodologies, was also developed. It effectively eliminates necessity for iterative design process and significantly reduces sensitive element design time. Complete mathematical model of the sensitive element motion was also used to develop systems of realistic simulation of gyroscope operation using Simulink/Matlab.

Mathematical model of Coriolis vibratory gyroscopes sensitive element in terms of demodulated signals was developed in the dissertation as well. This mathematical model was used to derive transfer functions of a dynamic system where angular rate is the input rather than system parameter as in the conventional models. Amplitude and phase responses of Coriolis vibratory gyroscopes from the angular rate frequency were used to both analyze amplitude and phase dynamic error and to develop methods of bandwidth and unit step transient process optimisation.

The derived set of the system transfer functions includes exact complex transfer function, slowly varying angular rate complex transfer function, split real and imaginary transfer functions, and the real valued simplified approximate transfer functions that connect input angular rate to the secondary amplitude and measured output angular rate. Performances of the latter transfer functions were studied and the acceptably good approximation of the sensitive elements within wide range of design parameters was demonstrated.

Coriolis vibratory gyroscope system transfer function was used to synthesise static optimal filters for stochastic process and sensor noises based on the Wiener method. Optimal filters were developed for the white and high-pass stochastic noises and

disturbances. Angular rate was described by low-pass power spectral density. Excellent performances of the designed filters were demonstrated using realistic numerical simulations. Obtained filters are static and represented by relatively simple transfer functions. They can be implemented using analogue electronics within application specific integrated circuits.

Sensitive element motion trajectory analysis resulted in simple and accurate expressions for the trajectory parameters, enabling alternative approaches to the angular rate measurements. System transfer function was used to obtain simple transfer function from the angular rate to the angle of the sensitive element motion trajectory rotation.

Apart from signal processing algorithms research and development in demodulated signals, low level performance improving systems in modulated signals were developed as well. Suggested in the dissertation decoupling system is capable of highly efficient removal of undesired cross-couplings between primary and secondary oscillations. Simple system of partial decoupling is developed along with the non-linear and highly efficient complete decoupling system. This approach to decoupling was also used to design low-level system of cross-sensitivity removal and successfully applied to dynamically tuned gyroscopes. At the same time, the former decoupling systems were used to design temperature errors compensation systems in case when temperature readings are available in the system.

Finally, system transfer functions for Coriolis vibratory gyroscopes were used to research and develop sensitive element control systems in demodulated signals. Simple and robust control system along with its transfer functions was designed to implement angular rate integrating operation mode. Highly efficient rotation angle measurement in presence of high noises was demonstrated using realistic numerical simulations. Force rebalance operation mode was implemented by another developed control system and its transfer functions. The latter system demonstrated improved performances of the angular rate measurements in terms of reaction time and measurement range.

Keywords: Coriolis vibratory gyroscope, dynamics, sensitive element, design methodologies, measurement error, signal processing, control