

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
ЛАЗЕРНІ НАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи ФТОІм-24-1
Данило РАХУБОВСЬКИЙ
(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. ФОЕТ Юрій КУРСЬКИЙ
(посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ _____
(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО
(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 175 Інформаційно-вимірювальні технології _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ «Фотоніка та оптоінформатика» _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Рахубовському Данилу Олексійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Лазерні навігаційні системи _____

затверджена наказом університету від « 10 » листопада 2025 р. № 1025 Ст _____

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _____ 17 грудня 2025 р. _____

3. Вихідні дані до роботи _____ волоконний гіроскоп; лазерний діод; суперлюмінісцентний діод; кутова швидкість. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Дослідити теоретичні основи роботи лазерів та фізичні принципи _____

2 Проаналізувати основні типи лазерних навігаційних систем _____

3 Дослідити математичні моделі та провести моделювання основних параметрів і режимів роботи волоконно-оптичних гіроскопів _____

4 Проаналізувати основні джерела похибок лазерних гіроскопів _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій_____

Демонстраційний матеріал – 13 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про лазерні навігаційні системи	02.09.25–22.09.25	Виконано
2	Аналіз фізичних основ лазерних навігаційних систем	25.09.25–06.10.25	Виконано
3	Дослідження принципів роботи основних типів лазерних гіроскопів	10.10.25–18.10.25	Виконано
4	Дослідження математичних моделей та характеристик волоконно-оптичних гіроскопів	22.10.25–28.10.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	01.11.25–13.11.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	15.11.25–19.11.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки тексту КвР на унікальність	25.11.25–06.12.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	09.12.25–12.12.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	16.12.25–18.12.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. каф. ФОЕТ Юрій КУРСЬКИЙ
(підпис) (посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 37 с., 7 рис.,
1 додаток, 9 джерел.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ГІРОСКОП, ЕФЕКТ САНЬЯКА,
ІНЕРЦІАЛЬНА НАВІГАЦІЯ, КУТОВА ШВИДКІСТЬ, ЛАЗЕРНИЙ
ГІРОСКОП, ЛАЗЕРНІ НАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ, МОДЕЛЮВАННЯ,
ПОХИБКИ.

Об'єкт дослідження – лазерні навігаційні системи, зокрема лазерні та волоконно-оптичні гіроскопи.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження теоретичних основ, принципів функціонування, характеристик, джерел похибок та перспектив розвитку лазерних навігаційних систем, а також аналіз методів їх моделювання та оптимізації для різних умов експлуатації.

Метод дослідження – теоретичний з використанням аналізу науково-технічної літератури, математичного моделювання та системного підходу до аналізу технічних систем.

Для досягнення мети в роботі поставлені та вирішені наступні завдання.

1. Дослідити теоретичні основи роботи лазерів та фізичні принципи (ефект Саньяка), що покладені в основу лазерних навігаційних систем.
2. Проаналізувати основні типи лазерних навігаційних систем (кільцеві лазерні гіроскопи, волоконно-оптичні гіроскопи, лідари), їх будову, характеристики, переваги, недоліки та галузі застосування.
3. Дослідити математичні моделі та провести моделювання основних параметрів і режимів роботи волоконно-оптичних гіроскопів, зокрема з метою оцінки чутливості, шумів та впливу зовнішніх факторів.

4. Проаналізувати основні джерела похибок лазерних гіроскопів (дрейф нуля, температурні впливи, шуми, нелінійні ефекти) та сучасні апаратні та програмні методи їх компенсації.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 37 p., 7 figures, 1 application, 9 sources.

FIBER-OPTIC GYROSCOPE, SAGNAC EFFECT, INERTIAL NAVIGATION, ANGULAR VELOCITY, LASER GYROSCOPE, LASER NAVIGATION SYSTEMS, MODELING, ERRORS.

The object of the study is laser navigation systems, particularly laser and fiber-optic gyroscopes.

The purpose of the qualification work is to investigate the theoretical foundations, principles of operation, characteristics, error sources, and development prospects of laser navigation systems, as well as to analyze methods for their modeling and optimization for various operating conditions.

The research method is theoretical, utilizing analysis of scientific and technical literature, mathematical modeling, and a systems approach to the analysis of technical systems.

To achieve this goal, the following tasks were set and solved.

1. To investigate the theoretical foundations of laser operation and the physical principles (Sagnac effect) underlying laser navigation systems.
2. To analyze the main types of laser navigation systems (ring laser gyroscopes, fiber-optic gyroscopes, lidars), their structure, characteristics, advantages, disadvantages, and fields of application.
3. To investigate mathematical models and simulate the main parameters and operating modes of fiber-optic gyroscopes, in particular to assess sensitivity, noise, and the influence of external factors.
4. To analyze the main sources of errors in laser gyroscopes (bias drift, temperature effects, noise, nonlinear effects) and modern hardware and software methods for their compensation.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1. Теоретичні основи лазерних навігаційних систем	10
1.1 Принцип роботи та характеристики лазерів.....	10
1.2 Навігаційні принципи та вимоги до лазерних систем.....	12
1.3 Основні типи лазерних навігаційних систем.....	14
2. Математичні основи та моделювання волоконних гіроскопів	18
2.1 Математичні моделі лазерних гіроскопів	18
2.2 Моделювання волоконних гіроскопів.....	20
3. Практичне застосування та перспективи розвитку волоконних гіроскопів	27
3.1 Застосування волоконних гіроскопів у сучасних навігаційних системах	27
3.2 Похибки, їх аналіз та методи компенсації	29
3.3 Моделювання роботи систем у різних умовах	32
Висновки.....	36
Перелік джерел посилання	37
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	38

ВСТУП

Лазерні навігаційні системи є однією з ключових складових сучасної високоточної навігації та управління рухом об'єктів у різних середовищах. Вони відкривають нові можливості для забезпечення автономності, підвищення точності та надійності визначення координат, орієнтації та траєкторії руху літальних апаратів, морських суден, наземних транспортних засобів, космічних апаратів та роботизованих систем.

Актуальність обраної теми обумовлена потребою в розробці та вдосконаленні високочутливих, стабільних і компактних систем навігації, здатних функціонувати в умовах відсутності зовнішніх орієнтирів або при тимчасовій втраті сигналів супутникових систем глобального позиціонування. Одним із найперспективніших напрямів у цій галузі є використання лазерних технологій, зокрема лазерних та волоконно-оптичних гіроскопів, що забезпечують безінерційне вимірювання кутових швидкостей з надзвичайно високою точністю.

Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження теоретичних основ, принципів роботи, особливостей конструкції та практичного застосування лазерних навігаційних систем, зокрема волоконно-оптичних гіроскопів, а також аналіз їх точностних характеристик та перспектив розвитку.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

- 1) дослідити теоретичні основи роботи лазерів та фізичні принципи, що лежать в основі лазерних навігаційних систем (ефект Саньяка);
- 2) проаналізувати основні типи лазерних навігаційних систем, їх будову, характеристики та галузі застосування;
- 3) дослідити математичні моделі та методи комп'ютерного моделювання роботи лазерних та волоконно-оптичних гіроскопів;
- 4) проаналізувати основні джерела похибок у лазерних навігаційних системах та сучасні методи їх компенсації.

Об'єктом дослідження є лазерні навігаційні системи, а предметом – їхні принципи дії, конструктивні особливості, точностні характеристики та методи підвищення їх надійності та ефективності. Новизна роботи полягає в комплексному аналізі сучасних лазерних навігаційних технологій з акцентом на волоконно-оптичні гіроскопи, моделюванні їх роботи та систематизації методів боротьби з основними джерелами похибок.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЛАЗЕРНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

1.1 Принцип роботи та характеристики лазерів

Лазери є основою сучасних прецизійних навігаційних систем завдяки своїй здатності формувати надзвичайно стабільне, монохроматичне та когерентне електромагнітне випромінювання. На відміну від звичайних світлових джерел, які генерують некогерентне випромінювання широкого спектра, лазер створює майже ідеально одномодовий промінь, хвилі якого мають однакову фазу, частоту та напрям поширення. Саме ці властивості забезпечують можливість точного вимірювання фазових зсувів, інтерференційних картин та змін частоти, що є фундаментом роботи лазерних навігаційних систем.

Основою будь-якого лазера є активне середовище, у якому можливе створення інверсії населеності енергетичних рівнів. Інверсія означає, що кількість атомів або іонів на збудженому рівні перевищує кількість частинок на нижчому енергетичному рівні. У природних умовах така ситуація неможлива, тому для досягнення інверсії застосовується зовнішнє накачування – оптичне, електричне або хімічне. Саме ця інверсія є критичною для запуску процесу вимушеного випромінювання.

Коли атом, що перебуває у збудженому стані, взаємодіє з фотоном відповідної енергії, він вимушено переходить на нижчий енергетичний рівень, випромінюючи другий фотон. Важливо, що цей новий фотон повністю дублює властивості початкового, тобто має ту саму частоту, фазу та напрямок руху. Таким чином виникає лавиноподібний процес підсилення світлового потоку, що робить можливим створення інтенсивного когерентного пучка [1].

Формування лазерного випромінювання відбувається в оптичному резонаторі, який зазвичай складається з двох паралельних дзеркал: одного повністю відбивного та одного частково прозорого. Резонатор забезпечує багаторазове проходження хвилі через активне середовище, а відтак –

багаторазове підсилення сигналу. Частина відбитого випромінювання виходить через напівпрозоре дзеркало, формуючи лазерний промінь.

Однією з ключових характеристик лазерів є довжина хвилі випромінювання, яка визначається різницею енергетичних рівнів активного середовища. Довжина хвилі впливає на взаємодію з оптичними елементами, ефективність інтерференційних систем і точність вимірювань. Частота лазерного випромінювання пов'язана з довжиною хвилі співвідношенням:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (1.1)$$

де c – швидкість світла у вакуумі;

λ – довжина хвилі випромінювання.

Будь-яка зміна довжини хвилі спричиняє зміну частоти, що у свою чергу впливає на точність вимірювань у лазерних гіроскопах та інтерферометрах. Для навігаційних застосувань частотна стабільність повинна бути надзвичайно високою. Часто використовують стабілізацію частоти за еталонними резонаторами або атомними переходами, що зменшує дрейф випромінювання до рівня від 10^{-10} до 10^{-12} .

Не менш важливою характеристикою є когерентність. Час когерентності визначає, наскільки довго лазер зберігає стабільну фазу хвилі, а довжина когерентності — максимальну відстань, на якій інтерференція залишається помітною. Для навігаційних систем потрібна довжина когерентності не менше кількох метрів, а для деяких типів лазерних гіроскопів — навіть десятків метрів.

Також важливою є потужність лазерного випромінювання, оскільки вона визначає інтенсивність сигналу та рівень шумів у фотодетекторі. Для навігаційних систем зазвичай використовують лазери невеликої потужності — від десятків міліватів до одиниць ват, що дозволяє забезпечити стабільність без надмірного теплового впливу на компонентну базу [2].

У контексті навігаційних систем важливими параметрами лазера є також стабільність амплітуди, спектральна чистота, надійність та довговічність. Навіть незначні зміни частоти, фази чи потужності можуть призвести до значних похибок, якщо вимірювання ґрунтується на інтерференційних ефектах або на прецизійному визначенні оптичної різниці ходу.

1.2 Навігаційні принципи та вимоги до лазерних систем

Лазерні навігаційні системи посідають ключове місце серед сучасних інерціальних та комбінованих навігаційних комплексів завдяки високій точності, стабільності та довговічності елементної бази. Їх робота ґрунтується на оптичних принципах вимірювання кутових швидкостей і переміщень, що значно зменшує вплив механічного зношування та зовнішніх перешкод порівняно з традиційними гіроскопічними або механічними сенсорами. В основі таких систем лежать інтерференційні та когерентні властивості лазерного випромінювання, що дозволяє здійснювати вимірювання з точністю до тисячних і навіть мільйонних часток градуса або метра.

Одним із фундаментальних фізичних принципів, на яких базуються лазерні навігаційні системи, є ефект Саньяка. Він полягає у тому, що під час обертання замкнутого контуру, по якому поширюється світло, оптичний шлях для двох зустрічних хвиль змінюється по-різному. Це призводить до виникнення різниці фаз, яка прямо пропорційна кутовій швидкості обертання системи. У лазерних гіроскопах та інтерферометрах ця різниця фаз визначається через інтерференційну картину або частотне розщеплення мод. Для кільцевого лазерного гіроскопа частотна різниця між двома зустрічними лазерними хвилями описується формулою [3]:

$$\Delta\nu = \frac{4A\Omega}{\lambda L}, \quad (1.2)$$

де A – площа замкненого контуру;

Ω – кутова швидкість обертання;

λ – довжина хвилі лазерного випромінювання;

L – оптична довжина контуру.

Чим більшою є площа замкненого контуру та чим меншою є довжина хвилі випромінювання, тим вища чутливість системи до обертання. Це один із ключових факторів, який визначає вимоги до конструкції лазерних навігаційних приладів.

Навігаційні системи повинні забезпечувати стабільність і точність вимірювань в широкому діапазоні умов — від спокійного режиму до високодинамічних маневрів. Тому до лазерів, які використовуються в таких системах, пред'являються особливі вимоги. Передусім, це висока частотна стабільність, оскільки навіть невеликий дрейф частоти може призвести до накопичення похибки у вимірюванні кутових швидкостей. Бажано, щоб відносна нестабільність частоти не перевищувала $10^{-10} - 10^{-12}$ на годину.

Також надзвичайно важливою є стабільність амплітуди та фази лазерного променя. Будь-які флуктуації інтенсивності можуть спричинити похибки у фотодетекторах, а зміна фази призводить до перекручення інтерференційної картини. У зв'язку з цим лазери для навігації часто оснащують системами автоматичного контролю та компенсації фазових зсувів, а оптичні елементи виготовляють з високоточного, малошумного матеріалу.

До лазерних навігаційних систем висуваються також вимоги щодо температурної стабільності. Зміна температури викликає деформацію оптичних компонентів, зміну показника заломлення та теплові зрушення резонатора. Для мінімізації впливу температурних варіацій використовують термостабілізовані корпуси, пасивні компенсатори або активні системи

нагріву та охолодження. Допустиме температурне відхилення у високоточних навігаційних комплексах не перевищує кількох сотих градуса.

Особливу увагу приділяють вимогам до когерентності лазера. Оскільки вимірювання базується на інтерференційних явищах, довжина когерентності повинна бути максимально великою, щоб інтерференційні смуги зберігали чіткість на всій довжині оптичного шляху. Довжина когерентності визначається шириною спектра лазера і може сягати десятків чи сотень метрів у прецизійних системах.

Не менш важливими є структурні вимоги: лазер повинен бути механічно стійким, нечутливим до вібрацій і прискорень, що особливо актуально для авіаційних та морських систем. Виробники застосовують демпфуючі матеріали, жорсткі оптичні основи, інварні сплави та спеціальні кріплення, що мінімізують зовнішні впливи.

У системи навігації також інтегрується високоточна електроніка, яка виконує обробку сигналів, фільтрацію шумів та компенсацію похибок. Для цього використовуються алгоритми цифрової фільтрації, адаптивні методи компенсації температурних та механічних зсувів, а також обчислювальні моделі для перетворення вимірюваних параметрів у кутові та лінійні координати.

1.3 Основні типи лазерних навігаційних систем

Лазерні навігаційні системи різняться за принципами вимірювання, конструктивним виконанням і областю застосування, проте всі вони ґрунтуються на властивостях когерентного лазерного випромінювання. У практичних навігаційних комплексах найпоширеніші класи пристроїв — кільцеві лазерні гіроскопи (RLG), оптоволоконні гіроскопи (FOG) та лазерні далекоміри/сканери (LIDAR). Кожен із цих типів має свої сильні й слабкі сторони, що визначає вибір технології для конкретного застосування [4].

Кільцевий лазерний гіроскоп (Ring Laser Gyro, RLG) реалізує вимірювання кутової швидкості через ефект Саньяка в активному середовищі: у замкнутому оптичному резонаторі, заповненому активним газом (наприклад, сумішшю гелію-неону), генеруються дві зустрічні лазерні хвилі. При обертанні контуру їх частоти розходяться через різницю оптичних шляхів. Ця частотна різниця прямо пропорційна кутовій швидкості обертання:

$$\Delta f = \frac{4A}{\lambda L} \Omega , \quad (1.3)$$

де A – площа замкненого контуру,

L – периметр резонатора,

λ – довжина хвилі випромінювання,

Ω – кутова швидкість.

Основні переваги RLG – відсутність механічно обертових частин, висока роздільна здатність і стабільність, можливість прямого цифрового виходу (підрахунку біттів). Це зробило їх стандартом для високоточних авіаційних та морських інерціальних навігаційних систем (наприклад, у літаках Boeing та Airbus). Головним недоліком є явище захоплення мод (mode locking) при дуже малих швидкостях обертання, що створює «мертву зону». Для його подолання застосовується примусове механічне коливання резонатора (джиттер), що дещо ускладнює конструкцію.

Оптоволоконний гіроскоп (Fiber-Optic Gyro, FOG) є пасивним інтерферометром Саньяка. Випромінювання від зовнішнього джерела розділяється на два потоки, які поширюються назустріч один одному по котушці з багаторазово намотаного одномодового оптичного волокна. Обертання системи призводить до різниці фаз між цими потоками, яка виявляється за інтерференційною картиною. Ця різниця фаз визначається формулою:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega = \frac{4\pi AN}{\lambda c} \Omega, \quad (1.4)$$

де D — діаметр котушки;

N — кількість витків;

c — швидкість світла;

$L = N \cdot \pi D$ — загальна довжина волокна.

Ключові переваги FOG — повна відсутність рухомих частин навіть у порівнянні з RLG, висока механічна та вібраційна стійкість, можливість масштабування чутливості шляхом збільшення довжини волокна, короткий час готовності. Відсутність активного резонатора також усуває проблему захоплення мод. Ці властивості, разом із потенційно нижчою вартістю, обумовили їх широке впровадження — від систем стабілізації та навігації безпілотників і наземного транспорту до високоточних систем для авіації та супутників. Детальному аналізу конструкції, моделюванню та оптимізації саме цього типу гіроскопів присвячена дана робота.

Лазерні далекоміри та LIDAR (Light Detection and Ranging) системи. Цей клас пристроїв принципово відрізняється від гіроскопів, оскільки призначений для вимірювання не кутової швидкості, а відстаней та форми навколишнього простору. Їх робота ґрунтується на методі часу пробігу імпульсу або фазовому методі. У найпростішому випадку відстань R до об'єкта визначається за час затримки τ відбитого імпульсу:

$$R = \frac{c\tau}{2}, \quad (1.5)$$

де c — швидкість світла.

LIDAR-системи активно сканують простір лазерним променем, створюючи тривимірну точкову хмару оточення. У навігації вони виконують роль допоміжного, але незамінного сенсора для картування середовища, виявлення перешкод та корекції позиції шляхом зіставлення отриманих

тривимірних карт із заздалегідь відомими або шляхом відстеження змін у реальному часі. Ці системи є основним засобом сприйняття для автономних безпілотних автомобілів, роботів, а також використовуються в авіаційній лідарній зйомці.

Вибір конкретного типу лазерної навігаційної системи визначається сукупністю вимог застосування:

- для прецизійної інерціальної навігації (наприклад, в авіалайнерах) традиційно домінують RLG завдяки їх високій довгостроковій стабільності;
- для застосувань, що вимагають високої надійності, стійкості до перевантажень і широкого діапазону точності (від промислових роботів до космічних апаратів), оптимальним вибором стають FOG;
- для автономного руху в невідомому або динамічному середовищі обов'язковим компонентом є LIDAR, який забезпечує інформацію про форму та розташування об'єктів.

2 МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОКОННИХ ГІРОСКОПІВ

2.1 Математичні моделі лазерних гіроскопів

Математичне моделювання є ключовим інструментом для аналізу, проектування та оптимізації лазерних навігаційних систем. Воно дозволяє досліджувати поведінку системи в різних умовах, оцінювати вплив різних факторів на точність та прогнозувати характеристики пристроїв до їх фізичної реалізації. Для лазерних гіроскопів, які є основою інерціальних навігаційних систем, таке моделювання ґрунтується на фундаментальних фізичних принципах, зокрема на ефекті Саньяка [5].

Базовою математичною моделлю, що описує роботу кільцевого лазерного гіроскопа (RLG), є рівняння для частотної різниці зустрічних хвиль, яке безпосередньо впливає з ефекту Саньяка:

$$\Delta f = \frac{4A}{\lambda L} \Omega, \quad (2.1)$$

де Δf – різниця частот зустрічних хвиль (бітів);

A – площа, охоплена замкнутим оптичним контуром;

λ – довжина хвилі лазерного випромінювання;

L – периметр оптичного контуру;

Ω – кутова швидкість обертання контуру.

Це рівняння є лінійним наближенням і справедливе для нерелятивістських швидкостей. Воно демонструє, що вихідний сигнал гіроскопа Δf прямо пропорційний до кутової швидкості Ω , а чутливість пристрою визначається геометричними параметрами A та L , а також довжиною хвилі λ .

Однак у реальних умовах на роботу RLG впливають численні неідеальності, які потребують уточнення моделі. Однією з ключових проблем

є ефект захоплення або зона мертвого ходу, коли при малих кутових швидкостях зустрічні хвилі синхронізуються через зворотне розсіювання в оптичному резонаторі, що призводить до нульового вихідного сигналу. Для опису цього явища використовують узагальнену модель, що включає член взаємного розсіювання:

$$\Delta f = \left(\frac{4A}{\lambda L} \Omega \right)^2 - \left(\frac{c\varepsilon}{L} \right)^2, \quad (2.2)$$

де ε – коефіцієнт зворотного розсіювання;

c – швидкість світла.

Ця модель показує, що для отримання ненульового вихідного сигналу необхідно, щоб швидкість обертання перевищувала порогове значення:

$$\Omega_{threshold} = \frac{\lambda c \varepsilon}{4A}. \quad (2.3)$$

Для подолання зони мертвого ходу на практиці застосують механічну модуляцію (обертання резонатора з малою амплітудою) або оптичну біазинг-модуляцію, які математично описуються додаванням періодичної складової до кутової швидкості Ω у вихідному рівнянні.

Для оптоволоконного гіроскопа (FOG) математична модель будується на основі інтерференції світла. Вихідна напруга фотодетектора U пропорційна інтенсивності інтерференційної картини, яка залежить від різниці фаз $\Delta\phi$ між зустрічними хвилями:

$$U = U_0 [1 + \cos(\Delta\phi)]. \quad (2.4)$$

Різниця фаз $\Delta\phi$, обумовлена обертанням, визначається як:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi LD}{\lambda c\Omega}, \quad (2.5)$$

де D – діаметр котушки з оптоволокна;

$L = N \cdot \pi D$ – загальна довжина волокна (N — кількість витків).

Таким чином, чутливість FOG може бути значно підвищена шляхом збільшення довжини волокна L або діаметра котушки D .

Для більш повного опису динаміки лазерних гіроскопів, особливо в умовах високих швидкостей обертання або при наявності нелінійних ефектів, використовують систему рівнянь Леймблаї, які описують взаємодію електромагнітного поля в резонаторі з активним середовищем. Ця модель дозволяє врахувати такі ефекти, як нелінійне поглинання, розширення спектральної лінії та взаємну синхронізацію мод.

Крім того, сучасне моделювання включає створення комп'ютерних моделей у середовищах (наприклад, MATLAB/Simulink, OptiSystem), які дозволяють проводити численні експерименти, досліджувати вплив окремих параметрів (таких як стабільність частоти лазера, чистота поляризації, рівень шумів у фотодетекторі) на загальну точність навігаційної системи та оптимізувати конструкцію для мінімізації систематичних похибок.

2.2 Моделювання волоконних гіроскопів

Моделювання є критично важливим етапом проектування та оптимізації волоконно-оптичних гіроскопів (FOG). Воно дозволяє проаналізувати вплив численних фізичних ефектів та конструктивних параметрів на чутливість, стабільність і точність пристрою без витратних експериментальних ітерацій. В основі моделювання лежить математичний опис ефекту Саньяка в оптоволоконному контурі, доповнений моделями ключових джерел похибок та методами їх компенсації.

Вихідною для моделювання є формула, що визначає різницю фаз $\Delta\phi$ між зустрічними хвилями в котушці волокна довжиною L та радіусом a при обертанні з кутовою швидкістю Ω :

$$\Delta\phi = \frac{4\pi aL}{\lambda c} \Omega = \frac{4\pi AN}{\lambda c} \Omega, \quad (2.6)$$

де A – площа, обмежена одним витком волокна;

N – кількість витків;

λ – довжина хвилі випромінювання;

c – швидкість світла.

Ця залежність демонструє, що чутливість FOG прямо пропорційна загальній площі, охопленій волокном ($A \cdot N$). Таким чином, моделювання дозволяє оптимізувати геометрію котушки (a , N) для досягнення необхідної чутливості, враховуючи практичні обмеження на габарити та втрати в волокні [6].

Важливим аспектом є вибір довжини волокна L . З одного боку, збільшення L підвищує чутливість. З іншого – зростають втрати та шуми. Теоретичний аналіз, що враховує дробовий шум фотодетектора та втрати α у волокні, визначає оптимальну довжину L_{opt} , за якої досягається найкраща можлива границя виявлення:

$$L_{opt} = \frac{1}{\alpha}. \quad (2.7)$$

Для стандартного волокна з втратами 2 дБ/км ($\alpha \approx 0,46 \text{ км}^{-1}$) оптимальна довжина становить близько 2,2 км. Графічна залежність чутливості від довжини волокна при різних α та λ (рис. 2.1) наочно демонструє область екстремуму та вплив довжини хвилі випромінювання.

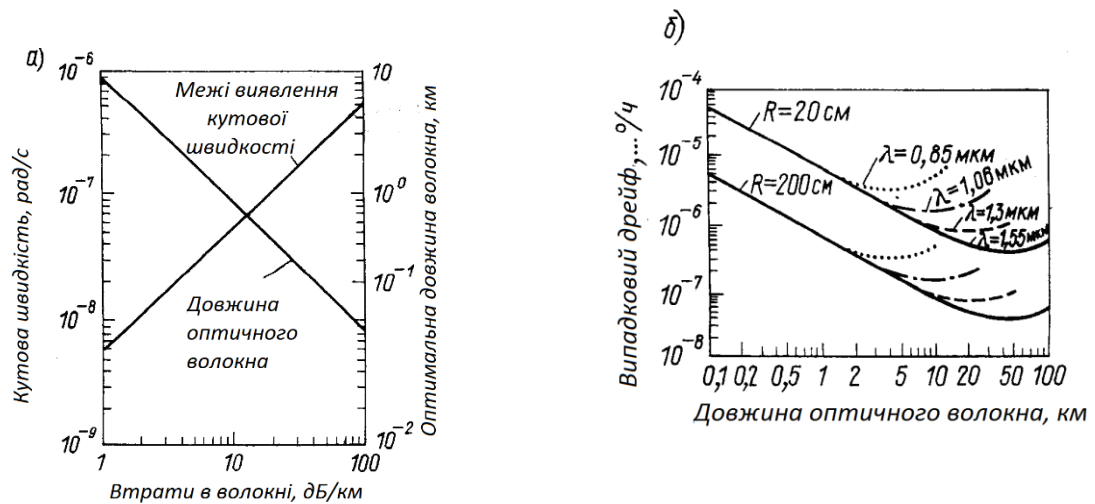


Рисунок 2.1 – Чутливість волоконно-оптичного гіроскопа при дробовому шумі світлоприймача при оптимальній довжині волокна а) та при різній довжині світлової хвилі б)

Реальна точність FOG обмежена низкою шумових факторів, які необхідно враховувати в комплексних моделях:

- коливання: нестабільність поляризації в одномодовому волокні призводить до дрейфу нуля. Моделювання поляризаційних режимів обґрунтовує необхідність використання поляризаторів, деполіаризаторів або спеціального волокна зі збереженням поляризації;

- зворотне розсіювання Релея: розсіяне світло інтерферує з основним сигналом, спричиняючи шум. Рівень цього шуму залежить від коефіцієнта розсіювання α_0 , частки зворотного розсіювання β_R та ширини спектра джерела Δf_s :

$$\text{Шум} \propto \frac{\alpha_0 \beta_R}{\Delta f_s}. \quad (2.8)$$

Моделювання підтверджує, що використання широкопasmових джерел світла (наприклад, суперлюмінісцентних діодів) суттєво знижує шум зворотного розсіювання (рис. 2.2).

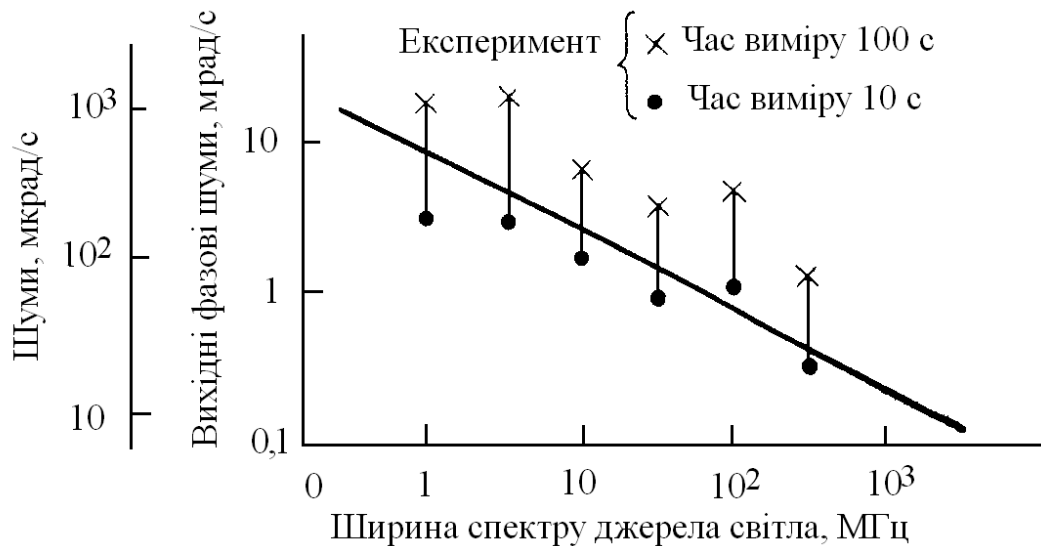


Рисунок 2.2 – Зменшення шумів релєївського розсіювання за допомогою розширення спектра світлового джерела

– температурні впливи: неоднорідний розподіл температури вздовж котушки викликає несиметричні зміни показника заломлення та довжини волокна, що моделюється як додаткова фазова похибка. Ефективним методом компенсації, підтвердженим моделюванням, є симетричне намотування волокна відносно середини котушки;

– нелінійні ефекти (ефект Керра): залежність показника заломлення від інтенсивності світла може призводити до утворення фантомних сигналів обертання при асиметрії потужності зустрічних хвиль.

Для подолання обмеженої чутливості в нульовій точці базового інтерферометра Саньяка розроблені та моделюються спеціальні схеми.

1. Система з фазовою модуляцією (рис. 2.3). У точці кінця котушки встановлюється фазовий модулятор, що вводить періодичну зсув фази. Це переносить робочу точку на лінійну ділянку інтерференційної характеристики. Моделювання динаміки такої системи дозволяє оптимізувати форму та частоту модулюючого сигналу для максимального підвищення чутливості та придушення шумів.

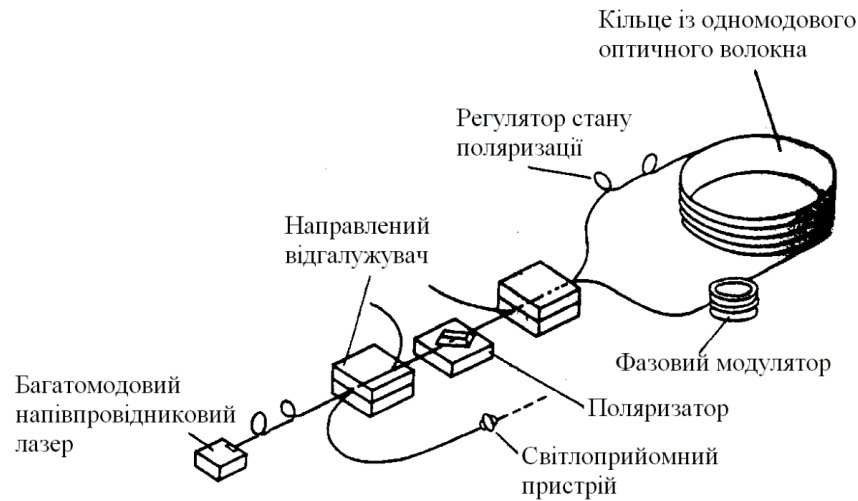


Рисунок 2.3 – Волоконно-оптичний гіроскоп з фазовою модуляцією, виконаний на волоконних функціональних елементах

2. Система зі зміною частоти (рис. 2.4). Використання акустооптичних модулаторів (АОМ) для створення частотної різниці між зустрічними хвилями дозволяє реалізувати нульовий метод вимірювання. Ключовим параметром моделювання є стабільність частоти зсуву, оскільки її дрейф безпосередньо впливає на дрейф нуля гіроскопа. Дискретна зміна частоти за певним законом дозволяє досягти динамічного діапазону до шести порядків.

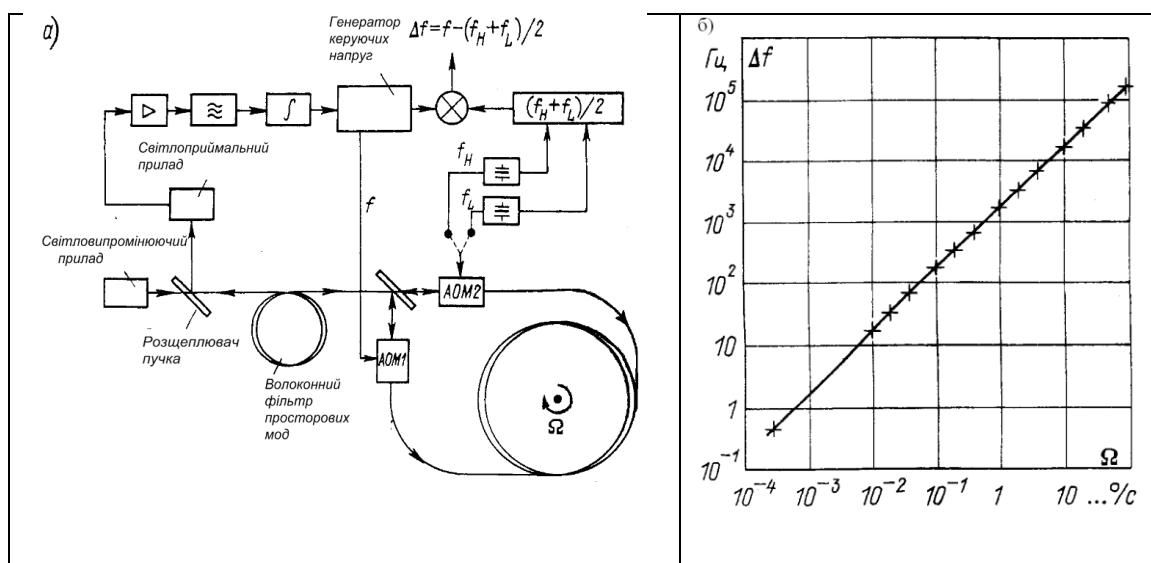


Рисунок 2.4 – Структурна схема волоконно-оптичного гіроскопа зі зміною частоти а) і динамічний діапазон б)

3. Система зі світловим гетеродинуванням (рис. (2.5, 2.6)). У цій структурі частоти зустрічних хвиль зсунуті на величину, що значно перевищує смугу сигналу. Це дозволяє реєструвати різницеву (бітову) частоту фотодетектором. Моделювання цієї схеми з використанням дифракційних решіток та акустооптичних модуляторів показує високу чутливість, але також виявляє вплив термічної нестабільності швидкості звуку в АОМ на дрейф нуля.

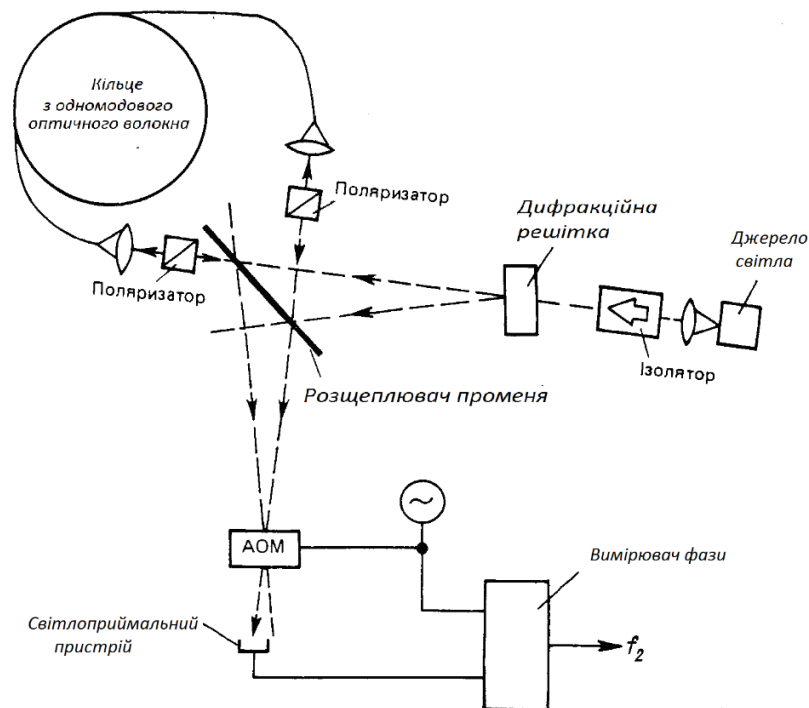
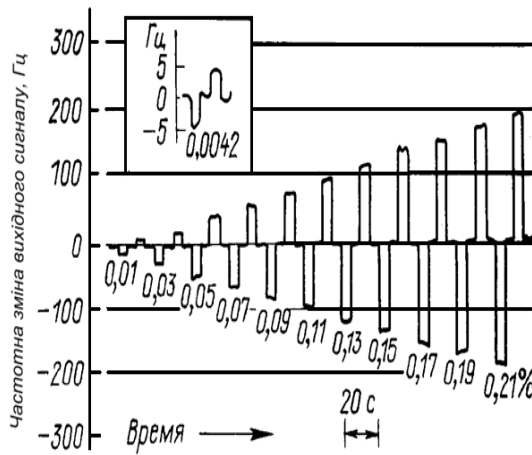
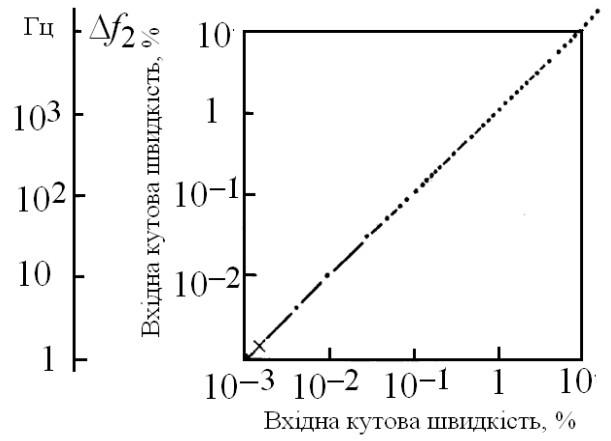


Рисунок 2.5 – Оптична схема волоконного гіроскопа зі світловим гетеродинуванням

Перспективним напрямом є мініатюризація FOG шляхом інтеграції оптичних компонентів (рис. 2.7). Моделювання хвилеводних структур на підкладці з ніобату літію (LiNbO_3), що виконують функції розщеплювача, поляризатора та фазового модулятора, дозволяє оцінити втрати, перехресні перешкоди та загальну стабільність системи, що є вирішальним для масового застосування.



а)



б)

а) виявлення обертання волоконним гіроскопом зі світловим гетеродинуванням;

б) виявлення обертання волоконним гіроскопом зі світловим гетеродинуванням – характеристика передачі.

Рисунок 2.6 – Система зі світловим гетеродинуванням

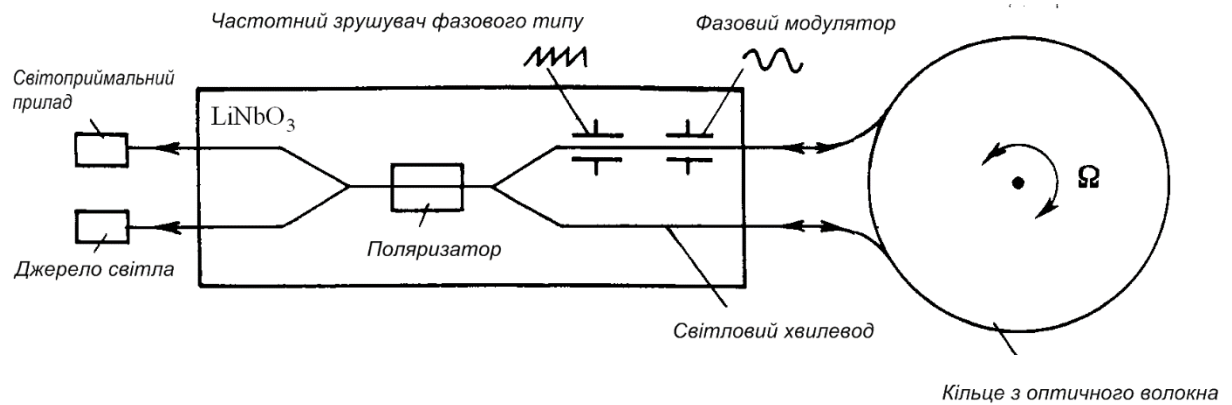


Рисунок 2.7 – Волоконно-оптичний гіроскоп зі зміною у зрушувачі фазового типу на інтегральній схемі

3 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВОЛОКОННИХ ГІРОСКОПІВ

3.1 Застосування волоконних гіроскопів у сучасних навігаційних системах

Волоконно-оптичні гіроскопи завдяки своїм унікальним характеристикам та структурній простоті вийшли за межі лабораторних досліджень і на сьогодні є ключовим компонентом у різноманітних високотехнологічних системах. Їхня роль як детектора абсолютної кутової швидкості в інерціальному просторі робить їх незамінними для прецизійного визначення орієнтації та навігації об'єктів у умовах відсутності зовнішніх орієнтирів (наприклад, сигналів GNSS).

Гіроскоп функціонує як абсолютний тахометр, будучи разом з трьома ортогональними акселерометрами та обчислювальним блоком основним елементом сучасної ІНС. Така система обробляє інформацію про кутові швидкості та лінійні прискорення, інтегруючи їх у часі для визначення координат, швидкості та курсу літака, судна, космічного апарату або наземного транспортного засобу. Вимоги до таких гіроскопів вкрай високі: роздільна здатність та дрейф нуля на рівні 0,01–0,001 °/год, динамічний діапазон до шести порядків та стабільність масштабного коефіцієнта на рівні 10^{-5} [7].

Успіх волоконних гіроскопів зумовлений рядом фундаментальних переваг порівняно з традиційними механічними та кільцевими лазерними гіроскопами (RLG):

- відсутність рухомих деталей: Це забезпечує високу стійкість до великих прискорень, вібрацій та ударних навантажень, що критично важливо для авіаційних та ракетних застосувань;
- статична структура: Відсутність механічного обертання або коливань (на відміну від RLG із системою «джиттерування» для подолання захоплення мод) підвищує надійність та довговічність;

- висока чутливість та можливість масштабування: Чутливість прямо пропорційна довжині волокна та площі котушки, що дозволяє гнучко проектувати пристрої під конкретні вимоги – від компактних сенсорів до високоточних лабораторних еталонів;
- короткий час готовності: практично миттєвий запуск, на відміну від механічних гіроскопів, що потребують розгону ротора;
- потенційно низька собівартість: використання стандартного одномодового волокна та прогресу в мікрооптиці та інтегральній оптиці відкриває шлях до масового виробництва.

Основні галузі практичного застосування:

- авіація та аерокосмічна техніка: волоконно-оптичні гіроскопи активно впроваджуються в системи навігації та управління літаків. Їх використовують у таких моделях як Boeing 757/767 та Airbus A310. Вони забезпечують точне визначення курсу, крену та тангажу, особливо важливе під час автономного польоту або при відсутності GNSS-сигналу;
- морська навігація: на суднах гіроскопи входять до складу інерціальних навігаційних систем, забезпечуючи стабільність курсу та компенсацію крену, що особливо важливо для великих суден та у складних погодних умовах;
- космічні апарати: надійність, стійкість до вібрацій при запуску та відсутність необхідності технічного обслуговування роблять волоконні гіроскопи ідеальним вибором для систем орієнтації супутників та космічних зондів;
- наземний транспорт та робототехніка: волоконні гіроскопи середнього класу точності знаходять застосування в системах стабілізації антен, у безпілотних наземних та повітряних апаратах, а також в автономних транспортних засобах для точного відстеження траєкторії руху;
- промисловість та геофізика: унікальна чутливість високоточних волоконно-оптичних гіроскопів дозволяє використовувати їх у нетипових сферах. Наприклад, для контролю орієнтації бури при бурінні свердловин або

у геофізичних дослідженнях для вимірювання флуктуацій власного обертання Землі, що має значення для сейсмології та фундаментальної науки.

Ринок гіроскопів стрімко розвивається. Такі компанії, як німецька SEL та французька Thomson-CSF (нині Thales), ще на початку 1990-х років демонстрували промислові зразки гіроскопів з дрейфом $3\text{--}15^\circ/\text{год}$, компактними габаритами (наприклад, $80\text{ мм} \times 80\text{ мм} \times 25\text{ мм}$) та масою близько 200 г. Сьогодні лінійка продукції охоплює пристрої від тактичного класу (дрейф $>1^\circ/\text{год}$) до навігаційного (дрейф $<0,01^\circ/\text{год}$) та стратегічного (дрейф $<0,001^\circ/\text{год}$) [7].

Головною тенденцією є мініатюризація та інтеграція. Активно ведуться роботи зі створення гібридних чи повністю інтегральних пристроїв, де всі оптичні компоненти (джерело випромінювання, розщеплювач, поляризатор, фазовий модулятор, фотодетектор) інтегровані на єдиній платформі – чи то спеціалізованому волокні з функціональними елементами, чи на чіпі з планарними хвилеводами на основі ніобату літію (LiNbO_3) або кремнію. Це дозволяє різко знизити вартість, габарити та підвищити надійність, відкриваючи шлях до масового застосування волоконно-оптичних гіроскопів в автомобільній промисловості, споживчій електроніці та робототехніці.

3.2 Похибки, їх аналіз та методи компенсації

Точність лазерних навігаційних систем значною мірою визначається рівнем похибок, що виникають як у самих лазерних гіроскопах, так і в допоміжних електронних та оптичних підсистемах. Оскільки вимірювання кутової швидкості ґрунтується на інтерференційних ефектах та надзвичайно малих фазових різницях, навіть незначні флуктуації частоти лазера, температурні зміни або механічні спотворення можуть спричинити суттєвий дрейф вихідного сигналу. Тому аналіз похибок та розробка методів їх компенсації є критично важливими елементами проєктування та експлуатації лазерних гіроскопів і всіх систем на їх основі.

Похибки лазерних гіроскопів традиційно поділяють на систематичні та випадкові. Систематичні похибки мають сталість або повільну змінність у часі й можуть бути значною мірою компенсовані шляхом калібрування або термостабілізації. Випадкові похибки проявляються як шумові флуктуації і визначають межу чутливості системи в короткочасних інтервалах.

Одним із ключових джерел систематичної похибки є зміщення нуля (bias), яке проявляється як ненульовий вихідний сигнал гіроскопа за відсутності реального обертання. Для кільцевого лазерного гіроскопа зміщення нуля може бути описане як додаткова частотна складова у рівнянні:

$$\Delta f = \frac{4A\Omega}{\lambda L} + \Delta f_{bias}, \quad (3.1)$$

де Δf_{bias} – дрейф або зміщення нуля, решта величин.

Дрейф нуля може бути спричинений внутрішнім розсіюванням на дзеркалах резонатора, асиметрією оптичного контуру, нерівномірністю накачування активного середовища та паразитними поляризаційними ефектами. Особливо значний внесок роблять температурні зміни, оскільки зсув геометрії резонатора навіть на десятки нанометрів призводить до відчутної зміни периметра L , а відтак — частоти обертальних мод [8].

В оптоволоконних гіроскопах основним джерелом похибок є бірефрингентні ефекти, такі як поляризаційна нестабільність та фотопружний ефект. При механічних впливах або температурних змінах оптоволоконна котушка втрачає однорідність поляризаційного стану, що призводить до спотворення фази зустрічних хвиль. Фаза сигналу FOG у загальному випадку може виражатися як:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{Саньяк}} + \Delta\varphi_{\text{пол}} + \Delta\varphi_{\text{фаз}} + \Delta\varphi_{\text{деф}}, \quad (3.2)$$

де $\Delta\varphi_{\text{пол}}$ – поляризаційно індукована похибка;

$\Delta\varphi_{\text{фаз}}$ – фазовий зсув внаслідок температури;

$\Delta\varphi_{\text{деф}}$ – деформаційний внесок.

Випадкові похибки лазерних систем визначаються такими факторами, як шум фотодетектора, ламане розсіювання на дзеркалах, шум інтенсивності лазера та квантовий шум. Найважливішим параметром для практичної оцінки випадкових похибок є дисперсія Аллана, яка описує динаміку дрейфу системи залежно від часу інтегрування. Функція Аллана дозволяє оцінити різні режими шумів: білий шум швидкості, дрейф з частотним зсувом, флікер-шум та довготривалий дрейф нуля [8].

Температурні похибки відіграють надзвичайно важливу роль у лазерних навігаційних системах. Навіть за умов високої термостабілізації залишаються резонансні ефекти, пов'язані з температурним коефіцієнтом розширення матеріалів, зміною показника заломлення та мікродеформаціями корпусу. Загальний температурний внесок у зміну периметра контуру можна описати рівнянням:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T, \quad (3.3)$$

де α – температурний коефіцієнт лінійного розширення;

L_0 – номінальна довжина контуру;

ΔT – зміна температури.

Цей ефект спричиняє додаткову похибку у частоті:

$$\Delta f_T = -\frac{4A\Omega}{\lambda L^2} \Delta L, \quad (3.4)$$

що демонструє, наскільки чутливими є лазерні гіроскопи до теплових впливів.

Окрему категорію становлять похибки через паразитні відбиття та розсіювання, що викликають явище захоплення мод. Воно призводить до

формування «мертвої зони», в якій гіроскоп не реагує на малі кутові швидкості.

Методи компенсації похибок включають апаратні та програмні засоби. Найпоширеніший апаратний метод – механічне або оптичне біазинг-модуляція, що зводить вихідний сигнал до області, де немає захоплення мод.

Також застосовують:

- активну термостабілізацію резонатора;
- використання дзеркал із наднизьким коефіцієнтом розсіювання;
- оптичні ізолятори для зменшення паразитних відбиттів;
- деполяризовані волокна в FOG;
- стабілізацію частоти лазера за допомогою резонансних камер.

Програмні методи включають:

- цифрову фільтрацію високих частот (для зменшення білого шуму),
- алгоритми компенсації дрейфу нуля за калібрувальними таблицями,
- фільтри Калмана для об'єднання даних з інших сенсорів,
- температурні моделі компенсації на основі експериментальних даних.

У комплексних навігаційних системах лазерні гіроскопи часто працюють у зв'язці з акселерометрами, GNSS-приймачами або магнітометрами. Для таких систем використовується інтегроване фільтрування, яке дозволяє частково компенсувати навіть ті похибки, що не піддаються апаратній корекції.

3.3 Моделювання роботи систем у різних умовах

Моделювання роботи лазерних навігаційних систем є ключовим етапом їх проєктування, калібрування та оцінювання точності. Оскільки лазерні гіроскопи та інші оптичні сенсори реагують на широкий спектр фізичних впливів — від температурних змін до вібрацій та збурень вимірюваної величини — створення математичних моделей дозволяє оцінити поведінку системи в умовах, які складно або дорого відтворити експериментально.

Моделювання також дає можливість прогнозувати похибки, підбирати оптимальні параметри конструкції та вдосконалювати методи цифрової обробки.

У загальному випадку модель лазерної навігаційної системи складається з моделі чутливого елемента (лазерного або оптоволоконного гіроскопа), моделі зовнішніх впливів, моделі шумів та математичних алгоритмів фільтрації сигналів. Для кільцевих лазерних гіроскопів фундаментом є рівняння різниці частот між зустрічними хвилями:

$$\Delta f = \frac{4A\Omega}{\lambda L}, \quad (3.5)$$

де в умовах реальної експлуатації кутова швидкість Ω замінюється на суму корисного сигналу та зовнішніх впливів. При моделюванні враховуються: зміна периметра резонатора, температурні дрейфи, механічні спотворення та шум генерації. У разі оптоволоконних гіроскопів аналогічно моделюється фазовий зсув [9]:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi A\Omega}{\lambda c} + \Delta\varphi_{\text{шум}} + \Delta\varphi_{\text{дист}}, \quad (3.6)$$

де $\Delta\varphi_{\text{шум}}$ – шумові компоненти,

$\Delta\varphi_{\text{дист}}$ – фазові спотворення, індуковані зовнішніми умовами.

Одним із головних напрямів моделювання є оцінювання поведінки системи за температурних змін. Температура впливає як на геометрію резонатора, так і на оптичні параметри середовища. У моделі часто використовують температурну залежність периметра:

$$L(T) = L_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (3.7)$$

де L_0 – номінальний периметр,

α – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу;

ΔT – зміна температури.

У результаті частота сигналу змінюється як функція температури, і це приводить до похибок, які оцінюються під час чисельного моделювання. Такі моделі дозволяють визначити допустимі межі температурної стабілізації та обґрунтувати необхідність використання матеріалів з низьким коефіцієнтом теплового розширення.

Механічні впливи також є важливою складовою моделювання. Віб्राції можуть спричиняти деформацію оптичного контуру та появу додаткових фазових затримок. Для оптоволоконних гіроскопів механічний вплив описують через фотопружний ефект, коли зміна напруження в оптоволокну змінює показник заломлення. Фазовий внесок такого впливу можна записати як:

$$\Delta\varphi_{\text{фаз}} = k_{\epsilon} \cdot \epsilon, \quad (3.8)$$

де k_{ϵ} – коефіцієнт фотопружності,

ϵ – деформація волокна.

Моделювання механічних впливів є особливо важливим для навігаційних систем, що працюють у транспортних, авіаційних або ракетних умовах, де рівень вібрації значний [9].

У системах з трьома або більше гіроскопами використовується векторна модель кутової швидкості. Для неї будують матрицю перетворення, що враховує орієнтацію кожного гіроскопа в просторі. Модель вимірювання має вигляд:

$$y = S\Omega + b + n, \quad (3.9)$$

де y – вектор виміряних сигналів;

S – матриця чутливостей;

$\mathbf{b}$ – вектор систематичних похибок;

n – шумові компоненти.

Моделювання такої системи дозволяє оцінити, які похибки будуть виникати при неправильному юстируванні або калібруванні гіроскопів, і як вони вплинуть на кінцеву точність навігації.

Важливою частиною моделювання є аналіз шумів за допомогою дисперсії Аллана, що дозволяє оцінити характер шумових складових сигналу залежно від часу інтегрування. У математичній моделі гіроскопа вводяться різні типи шумів: білий шум кутової швидкості, дрейф нуля, флікер-шум та інші випадкові компоненти. Для кожного з них моделюється його вплив на вихідний сигнал, а результати аналізуються за кривою Аллана для визначення оптимального часу інтегрування та ефективності методів фільтрації.

Загалом моделювання роботи лазерних навігаційних систем дозволяє оцінити як точність вимірювань у широкому діапазоні умов, так і стійкість алгоритмів обробки сигналів до зовнішніх збурень. Це також дає можливість розробляти адаптивні методи компенсації похибок, прогнозувати поведінку системи в реальних сценаріях та оптимізувати конструкцію гіроскопів для конкретних застосувань.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз фізичних принципів (ефекту Саньяка) та властивостей лазерного випромінювання підтвердив, що саме когерентність, монохроматичність і висока частотна стабільність лазерів роблять їх ідеальним інструментом для створення прецизійних сенсорів кутової швидкості, що є фундаментом сучасних лазерних навігаційних систем.

2. Систематизовано та порівняно характеристики ключових технологій: кільцевих лазерних гіроскопів (RLG), волоконно-оптичних гіроскопів (FOG) та лідарів (LIDAR). Встановлено, що RLG є стандартом для високоточних авіаційних систем, FOG — завдяки відсутності рухомих частин і масштабованості — мають найширший спектр застосувань, а LIDAR виконують критичну роль сенсора зовнішнього середовища для автономного руху.

3. На основі аналізу математичних моделей встановлено ключові залежності для волоконно-оптичних гіроскопів: чутливість прямо пропорційна площі котушки та довжині волокна, але обмежена оптичними втратами. Теоретично оцінено оптимальні параметри та визначено головні джерела похибок, що впливають на точність: температурні градієнти, поляризаційна нестабільність та шуми зворотного розсіювання.

4. Проаналізовано сучасні підходи до підвищення точності, серед яких як апаратні методи (фазова модуляція, використання широкосмугових джерел, симетричне намотування), так і програмні (цифрова фільтрація, алгоритми інтеграції даних). Головною перспективою розвитку визнано мініатюризацію та повну інтеграцію оптичних компонентів на чіпі, що відкриває шлях до масового впровадження високоточних систем у нові галузі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Тимчик Г.С. Лазерні Технології Конспект Лекцій. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 276 с.
2. Лакоза С.Л. Навігаційні системи. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021 р., 80 с.
3. Кучеренко О. К. Волоконно-оптичні гіроскопи. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 106 с.
4. Курський Ю.С., Мачехін Ю.П., Гнатенко О.С., Семенець В.В., Неофітний М.В. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи ч.1, Харків: ХНУРЕ., 2019 р., 156 с.
5. Мачехін Ю.П. , Гнатенко О.С. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи ч.2, Харків: Факт, 202. 145 с.
6. Український журнал дистанційного зондування Землі, том 8, 2021 р.
7. Lefèvre H. C. The Fiber-Optic Gyroscope. 2nd ed. Boston: Artech House, 2014. 391 p.
8. Ю.С. Курський, О.С. Гнатенко, О.В. Афанасьєва, Застосування суперконтинууму в оптичній гіроскопії. 2023 р.
9. Gabriel F. S. Nunes, Antonio P. S. D. Carvalho, Adalberto J. A. Tavares Junior. Simulation of an Interferometric Fiber Optic Gyroscope Applied to a Rocket Model, 2022 p.