

Власник документу:  
Бевза Олег Миколайович

ID перевірки:  
1000770378

Дата перевірки:  
13.12.2019 10:10:16 GMT+0

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
13.12.2019 10:32:52 GMT+0

ID користувача:  
90740

Назва документу: 2019\_Stranskyy\_Ways\_Hyroscope\_Improvements\_fch

ID файлу: 1000781254 Кількість сторінок: 25 Кількість слів: 12026 Кількість символів: 90697 Розмір файлу: 107.24 KB

## 1.42% Схожість

Найбільша схожість: 0.65% з джерело <https://ua-referat.com/%D0%92%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%B>.

1.42% Схожість з Інтернет джерелами

29

Page 27

Не знайдено жодних джерел у Бібліотеці

## 0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

## 0% Вилучень

Вилучений текст відсутній

## Підміна символів

Заміна символів

119

## РЕФЕРАТ

## Шляхи покращення вихідних параметрів волоконно-оптичного гіроскопу

Странський Юрій Артурович

**Ключові слова:** ВОГ –волоконно-оптичний гіроскоп, ММ –математична модель, ТД–тепловий дрейф, ФШ –фазова швидкість, МК – масштабний коефіцієнт, БНС –безпілотна навігаційна система .

**Короткий зміст роботи:** Дана дипломна робота присвячена дослідженню способів покращення вихідних параметрів сигналу волоконно-оптичного гіроскопа, в ній представлено результати інженерних розрахунків шумів і похибок, що негативно сказуються на роботу пристрою, а також математичну модель теплового дрейфа і її верифікацію.

У вступі сформульована головна задача роботи і показана її актуальність. В аналізі літератури представлений огляд пристроїв класифікації волоконно-оптичного гіроскопа, їх основні параметри та характеристики, та підтверджена перспективність їх розробки. В теоретичній частині розглянуто принципи роботи, існуючі методи прогнозу і корекції теплового дрейфу гіроскопа, представлені похибки, що впливають на сигнал гіроскопа . В конструкторсько – технологічному розділі продемонстровано розрахунок основних параметрів гіроскопа та представлено методики чисельного прогнозу і компенсації теплового дрейфу, наведені наступні параметри:

- діапазон вимірюваних швидкостей - 150 град / с,
- масштабний коефіцієнт (МК)  $k(T)$  - 7 мВ / град / с,
- робоча смуга частот - 0 ... 0,45 кГц,
- кутовий випадковий дрейф - 0,04 град /  $\sqrt{ч}$ ,
- дрейф нуля ( $1\sigma$ ) - 10 град / ч,
- стабільність МК ( $1\sigma$ ) - 0,1%.

## АНОТАЦІЯ

Дана дипломна робота присвячена дослідженню способів покращення вихідних параметрів сигналу волоконно-оптичного гіроскопа, в ній представлено результати інженерних розрахунків шумів і похибок, що негативно сказуються на роботу пристрою, а також математичну модель теплового дрейфа і її верифікацію.

Робота складається із вступу, аналізу літератури, теоретичної частини, методики інженерних розрахунків та висновків. У вступі сформульована головна задача роботи і показана її актуальність. В аналізі літератури представлений огляд пристроїв класифікації волоконно-оптичного гіроскопа, їх основні параметри та характеристики, та підтверджена перспективність їх розробки. В теоретичній частині розглянуто принципи роботи, існуючі методи прогнозу і корекції теплового дрейфу гіроскопа, представлені похибки, що впливають на сигнал гіроскопа . В конструкторсько – технологічному розділі продемонстровано розрахунок основних параметрів гіроскопа та представлено методики чисельного прогнозу і компенсації теплового дрейфу, наведені математичні моделі.

## Вступ

Волоконно-оптичний гіроскоп - оптико-електричний пристрій, основною функцією якого є визначення кутової швидкості, а також кута повороту об'єкта на якому він встановлений. Ефект Саньяка лежить в основі принципу дії ВОГ, а створення прибору завдячується стрімкому розвитку компонентів квантової електроніки.

Застосування і реалізація гіроскопа стала можливою лише із 60-ті роки 20 століття, що пояснюється появою на ринку перших оптичних лазерів, хоча теоретично перші спроби його застосування були ще на початку минулого століття. Першим прототипом в якості лазерів були саме кільцеві лазери, але їхній мінус був в наявності зони синхронізації частот зустрічних хвиль. Це зробило неможливим вимірювання невеликих кутових швидкостей. Робота вчених із всього світу на подолання цього недоліку дала початок

новому виду гіроскопів, які зараз широковідомі по всьому світу: а саме лазерні гіроскопи. Недоліки даних систем закладаються в величезних габаритах і високій вартості. Робота над волоконно-оптичним гіроскопом починається з початком 21 століття. Це було пов'язано із широким розвитком ліній зв'язку, що базувалися на оптичному волокні. Застосування саме таких компонентів дало можливість покращити характеристики ВОГ. Флагманами серед країн по розробкам волоконно-оптичних гіроскопів є США, Франція і Росія. На початку 80-х років дрейф найбільш точних ВОГ становив близько  $1^{\circ}/ч$ , а вже в 90-х роках цей параметр покращився на 2-3 порядки. Цікаво що всього лиш 2 десятки років потрібно було щоб із першого фізичного експерименту перейти до повноцінної розробки ВОГ, а більше того випускати велику кількість продукції, що знаходить застосування в засобах орієнтації і навігації об'єктів високого класу точності. Переваги які виділяють ВОГ серед інших типів гіроскопів, зокрема серед механічних наступні:

Невисока ціна при максимальному класі точності

Вимірювання швидкості в великому динамічному діапазоні

Нечутливість до впливів перевантажень і прискорень

Малий час готовності

Невисока потужність споживання

Побудова трьохосового блока чутливих елементів можлива завдяки відсутності перехресних зв'язків

Відсутність підшипників і механізмів, які можуть стиратися при обертанні

Якщо порівнювати ВОГ із лазерними гіроскопами то варто підмітити наступні переваги:

Простота конструкції

Маленька маса і габарити

Невисока собівартість

Широке застосування ВОГ дало можливість стати частиною таких сфер як: громадська і воєнна авіації, апаратур космосу і навігаційних ракет різних типів. Оцінка вчених Дрейперовської лабораторії (найбільший науково-дослідний центр у світі) говорить що ВОГ за наступні 15...20 років повністю витіснить з ринка чуттєвих елементів середньої і високоточної навігації всі інші типи ВОГ, в тому числі лазерні гіроскопи. На малюнку представлений прогноз учених для ВОГ серед інших типів гіроскопів.

## 1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОМУ ГІРОСКОПУ

### 1.1 Класифікація ВОГ

Причини виникнення помилок і паразитних сигналів в ВОГ на сьогоднішній день вивчені в повній мірі. Пошук методів компенсації сигналів, пов'язаних із обертанням, що у свою чергу призведуть до збільшення точності і стабільності показань ВОГ — завдання розробників номер один. Ціль даного огляд — навести основні схеми і методи обробки сигналів ВОГ, а також сформулювати актуальність проблеми появи теплового дрейфу внаслідок зміни показника заломлення світлопровідного волокна.

#### Рис.1.1. Класифікація ВОГ

В першу чергу ВОГ діляться по класу точності (табл. 1.1).

Далі ВОГ можна класифікувати за наявністю або відсутністю фазової модуляції (ФМ), по режиму роботи (закритий, відкритий цикли), по використовуваних компонентів (п'єзomodулятор (ПМ) або інтегрально-оптична схема (ІОС); супер люмінесцентний (СЛД) або волоконно-ербієве джерело світла (ВДС)), а також за ступенем поляризації поширюваних в волокні світлових хвиль (поляризований, деполіризований). на рис. 1.1. представлена класифікація ВОГ [1].

#### 1.1.1 Відкриті схеми ВОГ

Розгляд різних схем побудови ВОГ зручно почати зі схеми, показаної на рис.1.2, у волоконному виконанні.

#### Рис.1.2. Відкрита схема ВОГ

Для підвищення чутливості ВОГ при швидкостях обертання, які близькі до нуля використовується фазовий модулятор (ФМ), який представлений у вигляді п'єзокерамічного циліндрика. На нього намотується частина волокна. Фазова модуляція забезпечує перенесення робочої точки на круту, майже лінійну ділянку характеристики. Процес відбувається за рахунок внесення фазового зсуву між двома хвилями, що поширюються по контуру в протилежних напрямках. Це можливе як для прямокутного (рис.1.3.) так і синусоїдального (рис.1.4. б, в) сигналу.

Рис.1.3. Принцип модуляції синусоїдальним імпульсом

За рахунок розтягування волокна, намотаного на п'єзокерамічний циліндр, при подачі напруги в відбувається відносне зміщення фаз зустрічних хвиль. Залежність прикладеної напруги від показника заломлення кристалічного хвилевода (LiNbO<sub>3</sub>) використовується тільки при ІОС. Вплив модулятора на хвилі зворотних напрямів однаковий, тому невзаємний перехід здійснюється за рахунок його несиметричного розташування. Таким чином, одна хвиля проходить модулятор безпосередньо після розділення, а інша – через час  $T = L_n / c$ , де  $L$  - довжина волокна в котушці,  $n$  - показник заломлення хвилі,  $c$  - швидкість світла. Величина  $F = 1 / 2T$  є власною частотою інтерферометра. Модуляція по фазі ( $-\pi / 2$ ;  $\pi / 2$ ) відбувається з частотою  $T / 2$ . Для зменшення впливу асиметрії модульованого сигналу частота модуляції повинна бути рівною  $F$ .

Синусоїдальна модуляція також застосовується виробниками.  $T\Omega_m$ ,  $\Omega_m$ -кругова частота модуляції. Це вираз що характеризує відносну різниця фаз зустрічних хвиль. Сигнал інтерференції дорівнює:

де  $\Phi_m$  - амплітуда модуляції,  $t$  - час,  $I_0$  - інтенсивність світла джерела,  $\Phi_s$  - фаза Саньяка.

За допомогою функції Бесселя вираз (1.1) розкладається на гармоніки.

$J_0$ ,  $J_1$ - функції Бесселя відповідного порядку.  $\Phi_m = 1,85$  рад — амплітуда модуляції відповідно до максимального значення функції Бесселя. Першу гармоніку, яка залежить від  $\sin\Phi_s$  і змінює знак при зміні напрямку обертання використовують для отримання сигналу обертання конкретної задачі.

Рис.1.4 б,в. Принцип синусоїдальної модуляції

Контроль руху і стабілізація автоматичних систем здійснюється за описаною схемою НПФ ВОГ. Дані гіроскопи другого і третього класу точності, виконані по безрозривній технології мають наступні переваги: мініатюрність, легкість (від 40 г) і низьке енергоспоживання (> 1 Вт). Найбільша точність порядку 0.1-1 гр / ч можлива за рахунок використання волокна із збереженням поляризації[2].

### 1.1.2 Закрита конфігурація

Основні характеристики вихідного сигналу відкритого ВОГ: велика нелінійність, фонові шуми, а також залежність від фотодетектора і зміни середньої довжини хвилі випромінювання. Закриті схеми ВОГ використовуються для розширення динамічного діапазону і збільшення точності приладу. На рис.1.4г і рис. 1.5. зображений принцип даної схеми. Тут поряд з високочастотною синусоїдальною модуляцією  $\Omega_{m1}$  проводиться і низькочастотна модуляція меандром сигналом  $\Omega_{m2}$ , причому в приймальному пристрої один напівперіод сигналу меандру відсікається. При  $\Phi_s = \Phi_{m2}$  вимірюється значення обертання за рахунок обернення сигналу першої гармоніки в нуль. Посилення схеми детектування і відображеної оптичної потужності і відображення оптичної потужності не впливає на зворотній зв'язок, тому забезпечення лінійного відгуку з хорошою стабільністю відбувається саме закритою схемою.

Рис.1.5. Принцип роботи закритої схеми

Запуск циклу відбувається сигналом пилкоподібним сигналом постійної напруги. Даний сигнал здійснює оптичний зсув між світловими хвилями. Це відбувається для відновлення сенсор в стан, коли зсув фаз відповідає нульовій швидкості обертання. Методів закриття фази є три. Це пилковий подвійний сигнал, фазовий пилкоподібний сигнал і цифровий фазовий сигнал — крок[3].

Рис.1.6. Подвійний пилкоподібний сигнал

## 1.7. Цифровий фазовий крок

**1.1.3 Поляризовані і деполаризовані конструкції ВОГ**

Волокно із збереженням поляризації в промислових масштабах використовується для точних ВОГ, хоча можливі варіанти роботи і з деполаризованим світлом. Практика показує, що ВОГ на ДС не поступається характеристиками ВСП. Невироджена поляризація зменшує стійкість зсуву в ВОГ з деполаризацією (ДВОГ). Магнітне поле також формує помилки. Чутливість до ефекту Фарадея відбувається за рахунок хвиль із різними ступенями поляризації. Так як У ВОГ зі збереженням поляризації (ПВОГ) світло, в основному, має лінійну поляризацію, внаслідок залишкової еліптичності вектора поляризації проявляється ефект Фарадея. Чутливість ВОГ становить 0.0005 град / ч / Гаус. Встановлення на обох кінцях котушок зменшення магнітної і температурної чутливості дасть можливість досягнути кращі характеристики. Застосування тільки одного деполаризатора зменшує стійкість зміщення до 100 разів. Невзаємні сигнал заломлення — дефекти волокна, що в основному спричиняють похибки в ДВОГ. Для придушення впливу навзаємні випадкового сигнал заломлення необхідний деполаризатор достатньої довжини, зрощений щодо осі лінійної анізотропії точно під кутом 45°. Максимальна точність зрощування становить 0.5°. При такій точності світло виявляється деполаризованим на 96.6%. Стійкість зміщення ДВОГ при цьому склала 0.005 град / ч. Випадковий шум в ДВОГ в середньому на 17% вище, ніж в аналогічному ПВОГ. Його можна зменшити за рахунок збільшення глибини модуляції. Флуктуації коефіцієнта масштабування в значній мірі залежать від флуктуації поляризації в волокні. Значення сигналу інтерференції залежить від відносної орієнтації поляризацій. У гіршому випадку обидва променя потрапляють на фотодетектор у взаємно ортогональних поляризаціях і погасять один одного (так званий фединг сигналу). Для запобігання цьому явищу на вході і виході чутливої котушки ставляться деполаризатори. Вони квазівипадково і рівномірно розкладають світло по всім можливим станам поляризації. Ефективність деполаризації збільшується при використанні ІС з широким спектром [4].

**1.1.4 ВОГ з суперлюмінесцентними або волоконними ербієвими джерелами світла**

За рахунок того, що різниця ходу променів — ВОГ може містити джерело з довжиною когерентності, лише трохи більшої різниці ходу променів. Це дасть змогу нейтралізувати більшу частину розсіяного і відбитого світла. Низька когерентність погіршує інтерференцію з довжиною когерентності, лише трохи більшої різниці ходу променів. Для швидкості 0,1 град / год довжина когерентності становить величину порядку декількох мікрометрів. Довжина когерентності He-Ne лазера становить  $L_c = 6-30$  см, а для волоконних джерел світла (ВІС)  $L_c = 60-200$  мкм, у СЛД це значення наближається до 50 мкм. Зазвичай СЛД для середньої точності застосовують при довжині хвилі 820 нм. Це пояснюється циклічністю характеристик, дешевизною і нелінійністю. Недоліком СЛД являється висока залежність середньої довжини хвилі від температури, СЛД з потужністю 0.5-3 мВт у зв'язку з цим оснащені датчиком температури і елемент Пельтьє. ВІС може вводити в волокно більшу потужність до 100 мВт і більше (типово 5 мВт) довжина хвилі  $\lambda = 1.55$  мкм (мінімальні витрати у волокні), тобто в 50 разів краще, ніж у СЛД. Це дає змогу отримати більший робочий ресурс. Недоліками є надмірний шум інтенсивності, який сильно впливає на порогову чутливість [5].

**1.1.5 Трьохосові гіроскопи**

Три гіроскопа в тривимірному просторі потрібні для контролю параметрів. Спочатку використовувалася схема з одним ІС (СЛД), потужності якого вистачало для паралельного підключення трьох гіроскопів. Перехід до схеми об'єднання з використанням одного загального приймача і ІС (рис. 1.9) дав можливість реалізувати поділ каналів 2 способами. Частота ділиться методом роботи кожного ВОГ на своїй частоті модуляції. Незважаючи на перевагу безперервного отримання даних з усіх осей, недоліком є приглушення перехресної перешкоди між безперервною модуляцією і схемами детектування. Використання єдиної схеми обробки стало можливим за рахунок

тимчасового поділу. Реалізація відбувається на оптичних перемикачах, які направляють світло в потрібний гіроскоп, або на електричних перемикачах фазової модуляції. Функціонування конкретного гіроскопа в певний момент часу відбувається за рахунок подачі фазової модуляції[5].

### 1.2.Проблеми зв'язані з ВОГ та основні шляхи для їх модернізації

Промислова розробка діелектричного одномодового світловоду з малим загасанням сприяла створенню реального високочутливого ВОГ. Унікальні властивості приладу визначаються в першу чергу завдяки конструкції саме таких світловодів. Да них відносять: **експериментальну** чутливість (точність приладу), що на сучасному етапі розробок становить 0,01 град / ч і менше;

маса конструкції і малі габарити, що стало можливим завдяки створенню цілої схеми ВОГ на інтегрально оптичних схемах;

можливість вимірювати кутові швидкості в широкому динамічному діапазоні ( наприклад діапазон вимірювання швидкості повороту становить від 1 град / ч до 500 град / с);

невисокі затрати енергії, що має фундаментальне значення для автономних рухомих об'єктів на ВОГ;

висока надійність приладів та невисока ціна завдяки відсутності обертових механічних елементів(роторів) і підшипників;

Відсутність необхідності в розкручуванні масивного ротора динамічного гіроскопа, що сприяє швидкому часу готовності до роботи

Можливість створення простих високоточних систем повністю на дешевих твердих інтегральних оптичних конструкціях привернули увагу розробників систем управління при серійному виробництві. Унікальні технічні можливості волоконно-оптичних гіроскопів роблять їх джерелом створення сучасних навігаційних транспортних систем[5]. Розробка ВОГ також несе за собою низку труднощів. Перша пов'язана з технологією виробництва чутливих елементів через відсутність достатньої кількості якісного одномодового волокна, що зберігає напрямок поляризації.

Виробництво дільників світла , поляризаторів, фазових і частотних модуляторів, просторових фільтрів, інтегральних оптичних схем знаходиться в стадії розвитку, а число розроблених спеціально для ВОГ випромінювачів і фотодетекторів обмежена.

Друга проблема пов'язана із високою чутливістю до дуже малих зовнішніх і внутрішніх збурень, незважаючи на його простоту і високу чутливість до кутових швидкостей обертання. Це призводить до появи паразитних дрейфів, зниження точності приладу і фіктивних показань «фейкової» кутової швидкості.

До згаданих вище шумів можна віднести теплову нестабільність стану чутливого елемента, механічні удари, вібрації, акустичні шуми, флуктуації електричних і магнітних полів, оптичні нелінійні ефекти флуктуації інтенсивності і поляризації випромінювання, дробові шуми в фотодетектор, теплові шуми в електронних ланцюгах і ін[5].

Точність і надійність показань гіроскопа за рахунок зниження схильності до зовнішніх впливів може збільшитися завдяки:

оптичних волокон спеціального створення;

спеціальних методів фіксації оптоволоконного контуру і його укладки;

термостатування і віброзахисту його чутливого елемента завдяки оптимізації конструкції приладу.

*В даній роботі ми розглядатимемо основний тип похибок, яка пов'язана і з впливом температурно-збудженого волоконно-оптичного контура на вихідний сигнал ВОГ*

Оцінка ефективності конструкторських рішень стала можливою завдяки математичного моделювання складних взаємопов'язаних фізичних явищ термомеханічної та п'єзооптичної природи. Це дає змогу економити ресурси та отримувати більше інформативності результатів аналізу в порівнянні з процедурою натурних випробувань конструкції приладу[6].

Напівпровідникові лазери( лазерні діоди), суперлюмінесцентні діоди і світлодіоди застосовуються як випромінювачі при конструюванні ВОГ, газові лазери при цьому застосовують дуже рідко, незважаючи на значне здешевлення виробництва конструкції. Це пояснюється невідповідністю вимог конструкцій волоконно-оптичних гіроскопів : точну відповідність довжини хвилі випромінювання номінальною довжині хвилі світловода, де втрати мінімальні; забезпечення високої ефективності введення випромінювання в світловод; можливість роботи джерела випромінювання в безперервному режимі без охолодження; високий рівень вихідної потужності випромінювача; довговічність, міцність конструкції, а також мінімальні габарити, маса, споживана потужність і вартість[6].

Довжина площі контуру формується двома умовами:

- довжина волокна пропорційна фазового зсуву, тому чим більша довжина контуру тим більша точність системи в цілому;
- вплив параметрів загасання і нерегулярності волокна залежить від довжини контуру ВОГ.

Вибір фотодетекторів для ВОГ неможливий без забезпечення в широкому спектральному діапазоні максимальної інтегральної чутливості, також забезпечення мінімального теплового шуму і мінімальної еквівалентної потужності шумів. В порівнянні з іншими типами гіроскопів невелика маса і габарити має значний економічний ефект саме у ВОГ, так як вони використовуються при проектуванні ВНК для повітряних суден малої авіації[6].

Для застосування в літальних апаратах краще використовувати трирівневий волоконно-оптичний гіроскоп. Даний тип приладів має в своєму складі вертикально орієнтовані котушки, відносно поздовжньої і поперечної осей повітряного судна. Таким чином вирішення основних проблем ВОГ є перспективним напрямком в областях його застосування[6].

### 1.3. Точнісні характеристики сучасних ВОГ

Весь спектр ВОГ, що випускаються в даний час для об'єктів різного класу можна умовно розділити на три категорії:

- ВОГ середнього класу точності з рівнем дрейфу від 0,1 до 5 град / ч і стабільністю масштабного коефіцієнта  $\sim 10^3$  для тактичних ракет, літаків, автономних об'єктів і морських гірокомпасів;
- ВОГ високого класу точності для побудови навігаційних систем, що вирішують завдання визначення місця розташування і орієнтації в комплексі з триадою акселерометрів. У цьому випадку потрібні ВОГ з дрейфом порядку 0,01-0,006 град / ч і стабільністю масштабного коефіцієнта на рівні  $10^{-5}$  в діапазоні кутових швидкостей до 1000 град / с;
- прецизійні ВОГ для спеціальних літаків і підводних човнів з дрейфом краще 0,001 град / ч і дуже малим випадковим дрейфом.

Прикладом ВОГ середнього класу можуть бути пристрої фірми «Фізоптіка». Розроблені цією фірмою ВОГ побудовані по розімкнутій схемі (табл. 1.2.). Найкращі її зразки не виходять за рівень 0,1 град / ч. Вони, як правило, використовують п'єзокерамічні модулятори і мають аналоговий вихід[6].

Фірма «Оптолінк» займається розробкою замкнутої схеми ВОГ: багатофункціональний інтегрально-оптичний елемент, виготовлений на кристалах  $\text{LiNbO}_3$  методом високотемпературного протонного обміну, волокно типу PANDA, волоконний ізотропний розгалужувач, деполяризатор.

Даний тип пристроїв відноситься до середнього і високого класу точності(табл. 1.3.).

Серед зарубіжних виробників ВОГ слід зазначити такі фірми як Honeywell, Northrop Grumman і KVH (США), Litef і IXSEA SAS (Франція). Побудовані за замкнутою схемою ВОГ фірми IXSEA досягли якості, яка задовольняє самим вимогам, відповідним таким застосуванням, як, наприклад підводним і космічним. Основні параметри ВОГ фірм IXSEA [6] і Northrop Grumman наведені в табл.1. 4.

**Висновок:** В даному розділі розглянуто основні конфігурації ВОГ, запропоновано опис їх конструкцій, а також наведено основні параметри, переваги і недоліки даного типу гіроскопів. Також були сформовано і описано основну проблему досліджень: похибки, які пов'язані із впливом температурно-збудженого волоконно-оптичного контура на вихідний сигнал ВОГ.

Високочотні ВОГ є володіють наступними характеристиками

- цифровий контур, що є повністю замкнутий;
- оптичний модулятор із матеріалу ніобату літія, який окрім фазової модуляції дає можливість поляризувати і розщеплювати;
- джерела світла, що працюють в широкому діапазоні, довжина хвилі 1550nm (напівпровідники, що леговані ербієм);
- оптоелектронні детектори із високою чутливістю;
- різноманітна технологія намотування, що дає змогу збільшити щільність намотки і мінімізувати температурну залежність.

## 2.Принцип дії і паразитні спотворення корисного сигналу ВОГ

### 2.1.Ефект Саньяка

Дослід Саньяка формульно представлений на рис.2.1. Коротко представлю основні особливості досвіду . В інтерферометр заходить поляризований пучок світла S, де відбувається поділ на два пучка і обхід в зустрічних напрямках. Коли пучки об'єднуються знову на фотопластині ФП реєструється інтерференційна картина. Експерименти показують, що обертання установки призводить до порушення фотопластини, порушується ( зсувається) пропорційно швидкості обертання. Оптична довжина шляху стає різною для зустрічних пучків при обертанні.

Основна проблема даного експерименту це невисока чутливість, о прямопропорційна площі контуру. Це говорить про те, що ефект Саньяка можливий лише при більшій чутливості. Перехід із фазового вимірювання до вимірювання частоти може підвищити частоту. Це пов'язано із ідеєю створення лазерів для кутових переміщень, а точніше ідея лазерного гіроскопа.

Наступний спосіб для покращення чутливості є застосування світловолокна. Це можливе лише тоді коли волокно створює котушка з багатьма витками, чутливість буде збільшуватися в число що прямо пропорційне кількості витків котушки[7].

Різниця оптичних довжин  $\Phi = 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda}$  визначається різницею зустрічних хвиль на виході

інтерферометра Саньяка. Вираз для різниці фаз в радіанах  $\Phi_s = \frac{8\pi S}{\lambda c} \Omega$  , обумовлює

собою різницю фаз  $\Phi_s$  , яка визначається з ефекта Саньяка або з обертання, при тому що  $\Delta L$  на пряму залежить від швидкості обертання(вираз (2.1)). Якщо котушка із N кількістю витків формує замкнутий контур, то ефективна площа інтерферометра буде рости в N разів. Вираз різниці фаз зустрічних хвиль після обходу контура буде мати вигляд де L - довжина волокна в оптичному контурі, враховується, що  $S = \pi R^2$ .

На рис.2.1 показана інтерференційна картина після додавання пучків на виході інтерферометра. Координата задається розподілом інтенсивності світла у просторі. Інтенсивність у формулі 2.3 визначається з умови того, що світлові пучки на виході інтерферометра йдуть під кутом  $\alpha$  один до одного.

Ідеальність складання пучків на виході інтерферометра визначає інтенсивність світла в інтерференційній картинці за формулою:

З урахуванням формули 2.2 можна стверджувати, що при зміні швидкості обертання також змінюється:

інтенсивність по  $\cos$  (якщо  $\alpha = 0$ );

вигляд інтерференційної картина(якщо  $\alpha \neq 0$ ).



Надалі  $\alpha = 0$ . При даній умові інтенсивність світла залежить від швидкості обертання по іншому. Вихідна характеристика ВОГ( відношення різниці фаз зустрічних хвиль до інтенсивності в інтерференційній картинці) має істотну нелінійність.

Рис.2.1 Залежність інтенсивності світла від швидкості обертання

Область малих швидкостей обертання характеризується невисокою чутливістю. Це пояснюється розміщення робочої точки в вершині конуса.  $\frac{\varphi_s}{\Omega}$  – розмірність часу,

називається чутливістю ВОГ до швидкості обертання, як правило вимірюється в секундах і виражається за певних умов в  $\Omega \mu$ . Якщо швидкість обертання визначається як  $\Omega \mu$ , то різниця 1 мікрорадіан це різниця фаз хвиль що йдуть назустріч. Межа шуму і нестабільність зсуву нуля за такої умови лежить в межах 0,1 до 10 мкрад. Також зміна площі волоконної котушки призведе до зміни чутливості ВОГ. Зміна геометрії напрямку визначає чутливість прибору в цілому, що формує його перевагу, так як для різних класів точності можна застосовувати одні і ті ж компоненти, не змінюючи особливості конструкції[7].

Параметри двох варіантів ВОГ з високою і середньою чутливістю наведені в таблиці 2.1 ( $\Omega \mu$  - швидкість обертання, відповідна різниці фаз, рівна  $\pi$ )[10]:

Основні ліміти на чутливість ВОГ накладає саме дробовий шум( фотонний шум), але лише принцип взаємності дає змогу досягнути максимальну точність ВОГ при поширенні світла в лінійному середовищі[7].

## 2.2.Паразитні спотворення корисного сигналу ВОГ

ВОГ володіє низкою властивостей що обумовили його широке застосування: малі габаритні розміри, невисока енергоспоживча здатність, висока надійність і точність, а також малий час готовності. Значення габаритних розмірів цілком визначаються оптичним волокном – нормальна укладка волокна без механічного пошкодження кварцового хвилеводу вимагає мінімум 4-5 см радіусу внутрішньої котушки. Відсутність рухомих елементів визначає високу надійність. Точність ВОГ залежить від великої кількості чинників: починаючи від методів укладки волокна і закінчуючи його характеристиками і характеристиками джерел випромінювання. Ціна приладу також визначається цими параметрами. Це і стає причиною першого недоліку: чим вища точність пристрою, тим більша якість матеріалів вимагається. Зокрема компоненти для поділу світлової хвилі, модулятори з високою точністю, низько когерентні джерела і одномодові оптичні волокна з мінімальними втратами– все це однозначно збільшує вартість ВОГ[1].

Окрім значної ціни ВОГ є дуже чутливим до різних впливів навколишнього середовища. Це пов'язано із фізичною природою ефектів, що з'являються в волоконно-оптичному контурі. Основними джерелами «фейкових» значень ВОГ є температура, електромагнітні нестационарні поля, механічні і акустичні впливи. Всі ефекти, що спричиняють нестабільність вихідного сигналу в ВОГ можна умовно розділити на дві групи: повільні та швидкі. Швидкі ефекти мають нетривалий характер, їх зручно прослідкувати при швидкості обертання рівній нулю. Прикладом ударної дії, що призводить до короткочасних виплесків амплітуди є рис 2.2, а. Іншим прикладом короткочасного впливу є нестационарний тепловий ефект, відгук пристрою на який показано на рис 2.2, б. Графік показує відхилення вихідного сигналу ВОГ більш ніж на 0.4 %/ч протягом 1,5 години. Температура змінюється від +20°C до +60°C[4].

Рис. 2.2 а) механічний вплив( удар), б) повільний температурний вплив( чорна лінія – температура по датчику)

Причини появи термічної і механічної похибки подібні: в обох випадках це зміна показника кварцового хвилеводу, спричинена зміною в часі НДС оптоволокна. Враховуючи ефект фотопружності, потрібно брати до уваги, що показник заломлення кварца має здатність до лінійного росту із ростом температури. Якщо показник заломлення змінюється нестационарно, то швидкість поширення випромінювання джерела стає неоднаковою в різних ділянках оптоволокна. Як наслідок за різний час навіть у стані

спокою (відсутність зміщень і обертань) кожний промінь пройде власний оптичний шлях. Різниця може змінюватися від незначної в  $0,001-2^\circ/\text{ч}$  до критичної (більше  $100^\circ/\text{ч}$ ). Механічна індукована невзаємність нетривала по часі і має характер одномоментного сплеску в показниках приладу до десятків або сотень градусів в момент удару, термічний індукований дрейф навпаки більш тривалий по часі.

Це спричинено матеріалами оптичних волокон, а також матеріала що їх зв'язує. Як правило це низько теплопровідні полімери із коефіцієнтом теплопровідності прядка  $0,2 - 1 \text{ Вт/м/К}$  і суттєвою зміною питомої теплопровідності від  $2000$  до  $4000 \text{ Дж/кг}^\circ\text{C}$  в діапазоні температур від  $0^\circ\text{C}$  до  $60^\circ\text{C}$ . Це ускладнює нагрів і зміну геометричних розмірів оптоволокон.

Окрім температури або механічного впливу, ВОГ також піддається впливу електромагнітного і акустичного, також ефектам всередині контура, що мають фізико-оптичну природу: ефект Фарадея, Ефект Керра і Релеєвське розсіювання[4].

Принцип ефекту Фарадея заключається в повороті під дією магнітного однорідного поля площини поляризації лінійно-поляризованого світлового імпульса (рис.2.3).

Рис. 2.3 Ефект Фарадея

Так як Ефект Фарадея є невзаємним ефектом, то реєстрація здвигу фази буде за рахунок того, що при наявності подвійного променезаломлення в оптоволоконі взаємна і невзаємна фаза є не повністю компенсованою. Можливий варіант використання волокна, де поляризація зберігається ( Panda наприклад), але через недосконалість виготовлення оптоволокон цей ефект всерівно з'являється. Як правило, додатковий захист у вигляді електромагнітних екранів робить вірогідність появи ефекту майже нульовою. Ефектом що також впливає на значення показань є зворотне Релеєвське розсіювання. Суть полягає в тому, що при поширенні в хвилеводі світловий промінь може відбиватися, розсіюватися на неоднорідностях показників заломлення, які з'являються на розділеннях волоконно-оболонка, а також при випадкових вклученнях в хвилеводі[4].

Рис. 2.4 Ефект Фарадея

Крім того, що хвиля починає поширюватися в зворотному напрямі, її фазу неможливо передбачити через випадковість процесу. Після накладання відбитої хвилі із основними і виникає здрив фази вихідного сигналу. Максимальне значення може становити  $0,2 \text{ рад/с}$ . Низькокогерентні джерела випромінювання – це новий метод боротьби з даним видом розсіювання.

Наступним ефектом що формує вплив на показання ВОГ є ефект Керра(рис.2.4). Суть заключається в зміні коефіцієнта заломлення оптоволокон під впливом електромагнітного поля. Даний ефект є також нелінійним, в результаті чого з'являється «фейкова» різниця фаз і змінюється потужність зустрічних хвиль.

Широкопasmове джерело випромінювання повністю вирішує дану проблему. Окрім швидких і повільних впливів можливі і похибки, уникнути яких неможливо так як вони виникають в електронних і оптичних компонентах ВОГ. Це дробовий шум, який можливий тільки в корисному сигналі, а також шум джерела випромінювання і т.д. Ці шуми визначають поріг чутливості ВОГ[7].

### 2.3.Методи боротьби з дрейфами сигналу ВОГ

Процес виникнення теплового дрейфу пояснюється наступним: в середині контуру є ділянка ( $L/2$ ), де зустрічаються світлові хвилі, що за один і той же час пройшли різні ділянки контура. Якщо нагрів нестаціонарний і неоднорідний, то зміна показника заломлення і зміна довжина волокна буде нерівномірною. Таким чином, у кожної світлової хвилі буде свій час проходження по контуру. Фаза Саньяка буде з'являтися тоді коли буде різниця в часі, тобто чим далі від центра симетрії розміщений учасок волокна, тим більший вплив на фазу Саньяка він спричинить, так як за більший проміжок часу між проходженнями хвиль буде відбуватися більша зміна світлового шляху(рис.2.5).

Рис. 2.5. Схематичне поширення хвиль світла.

Забезпечення високої якості сигналу і зменшення похибок потребує максимальну симетрію мінімальної конфігурації ВОГ. Це можливе за рахунок дільників світла, що розчіплюватимуть світло(промінь) на два однакових по інтенсивності променя. Також важливо забезпечити систему якісними інтегральними оптичними схемами і модуляторами, де коефіцієнт втрат відповідає вимогам ВОГ. Окрім дільників світла важливою є висока чутливість, що забезпечується фотодетекторами або вживлянням в конструкцію фотоелектронним помножувачів сигналу. Процес базується на генерації додаткових фотоелектронів на кожний захоплений фотон, які власне і створюють імпульси на виході помножувача( імпульси дають змогу оцінити помножувач).

Наступною умовою є спосіб укладання оптоволокна. Це також впливає на симетричність мінімальної конфігурації ВОГ. Чим більш симетрично укласти оптичне волокно в котушку тим більше термічно індукваного дрейфу можна уникнути. Найпростішим способом укладки є дипольна схема. Все починається з середини: спочатку одна гілка волокна намотується в один шар, потім на неї наступна і так далі (шари обов'язково чергуються і йдуть двома гілками). При нагріві такого волокна відбувається рівномірне поширення температури від центра з однаковою довжиною волокна. Це знижує взаємність сигналу внаслідок оптичного подовження. Кращим варіантом є квадрупольна схема укладки волокна. Шари волокна чергуються за таким же принципом, головна відмінність в наявності блоків із чотирьох слоїв з реверсом від пари до пари( дипольна схема базується на чергуванні по 2 шари).

Окрім симетричності мінімальної конфігурації ВОГ окремо захищають від зовнішніх впливів: застосування феромагнітних і теплових екранів, де перші захищають від електромагнітного випромінювання, а інші компенсують нерівномірність термічних впливів за рахунок вирівнювання температури поля. Екрани виготовляють із теплопровідних дюралюмінієвих сплавів.

Окрім екранів можливим є підбиранням форми каркаса ВОГ і проведення подальших дослідів матеріалів. Це важливо, так як коефіцієнти температурного розширення каркаса і оптоволокна повинні бути близькими за значенням( інакше є ризик фіктивного набігу деформованих витків на границі із каркасом). Матеріал для каркасів: титан, ситал і композитні матеріали із вуглепластику. Змінюючи спосіб намотки також можна змінювати теплофізичні і механічні властивості, тим самим можна задати каркасу із прямокутно-поперечним профілем потрібних властивостей в радіальному і осьовому напрямку[8].

#### 2.4. Розрахунок похибок волоконно-оптичного гіроскопа

Розглянемо і розрахуємо основні похибки, причиною виникнення яких є зміна поляризації, температурні градієнти, вплив дробових шумів, вплив релеевського розсіювання.

При розрахунку похибок використані наступні параметри ВОГ, константи і позначення:

Довжина хвилі лазерного джерела світла  $\lambda = 1.55$  мкм.;

Число контурних витків  $N = 318$ ;

Діаметр волоконного контуру  $D = 1$  м.;

Довжина волокна  $L = 1000$ м.;

Швидкість світла у вакуумі  $c = 3 \times 10^8$  м / с.;

Коефіцієнт ослаблення, обумовлений релеевським розсіюванням  $\alpha_s = 0.002$ ;

Коефіцієнт спрямованого розсіювання уздовж волокна  $G = 1$ ; лінійний кут вводу випромінювання волоконного сердечника  $\beta = 0.1$  рад.;

Показник заломлення серцевини волокна  $n = 1.48$ ; постійна напруженості магнітного поля Землі  $H = 40$  А / м.;

Постійна Верде  $V_\lambda = 2.6 \cdot 10^{-6}$  радий. / А.;

Кут повороту площини поляризації  $\gamma = \pi / 3$ ;

Смуга пропускання частот системи виявлення та обробки сигналу  $\Delta f = 10$  Гц.;

Частота випромінювання  $f = 1.77 \times 10^{14}$  Гц.;

Потужність лазера  $P = 1$  мВт.;

Постійна Планка  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Дж / сек.;

Зміна температури між початковим моментом роботи ВОГ і кінцевим, по перетині котушки контуру  $\Delta T = 0.001^\circ \text{C}$ ;

Зміна показника заломлення при зміні температури волокна

Коефіцієнт лінійного розширення оптоволокна  $\alpha = 1 \cdot 10^{-6}^\circ \text{C}$ .

Зміна кута поляризацію породжується впливом магнітного поля Землі. Формулу і розрахунок цієї похибки ( $\psi$ ) наведений нижче [9].

Похибка температурних градієнті виникає за рухунок механічних напруг у контура, випадкових стрибкоподібних змін температури, неправильної укладки оптоволокна. Використовуючи задані для ВОГ дані зробимо розрахунок цієї похибки  $\theta_T$  (2.6):

Похибка релєвського розсіювання пов'язана із повторним відбиттям світла на мікрочастинках і неоднорідностях середовища. Складова через яке виникає зворотне зовнішнє розсіювання і шуми відображення підсумовуються векторно з протилежно біжучими променями, що призводить до помилки в різниці фаз. Дана похибка з використанням заданих формул наведена в (2.7):

Наявність дробового шуму можлива лише в присутності корисного оптичного сигналу на виході фотодетектора і пов'язаний із неоднозначним розподілом швидкості приходу фотонів на фотодетектор. Це призводить до появи флуктуацій струму фотодетектора. Формула розрахунку (2.8) цієї похибки наведена нижче[9]:

Так як похибки є випадковими величинами, то завжди можа знайти значення середньоквадратичної помилки ВОГ. Що стосується похибок, що виникають через релєвське розсіювання  $\Omega = 0.007 \text{ рад/с}$  і через вплив дробового шуму  $\Delta \Omega = 0.56 \cdot 10^{-9} \text{ рад/с}$  то вони несуть інформацію зміни кута в одиницю часу. У нашому випадку вимірювання проводиться один раз в секунду, тому похибка виражається в зміні кута протягом однієї секунди. Середньоквадратична похибка прибору [9]:

**ВИСНОВОК:** В даному розділі розглянуто основні ефекти на основі яких працює ВОГ, а також розглянуто основні похибки, які формують негативний вплив на сигнал ВОГ. Проведений розрахунок основних похибок пристрою на основі довідникових даних. Було встановлено, що похибки впливу дробового шуму і впливу температурних градієнті є меншими на сім і чотири порядки відповідно ніж шуми, що викликані зміною кута поляризації і релєвським розсіюванням. При цьому цими даними неможна знехтувати, так як вони визначають чутливість цілої системи. Можна сказати, що негативний вплив на сигнал також роблять саме похибки зміни кута поляризації і похибки релєвського розсіювання.

Зменшення даних похибок можливе за рахунок:

- 1) Застосування одномодового волокна в якому зберігається поляризація.
- 2) Встановлення поляризаційного фільтра в контур.
- 3) Експлуатація ВОГ тільки із оптоволокном, що має коефіцієнт загасання не більше  $0.2 \text{ дБ/км}$
- 4) Розміщення всередині контуру модулятора випадкової фази, щоб декорелювати шум зворотного розсіювання.

### 3. Тепловий дрейф волоконно-оптичного гіроскопа

#### 3.1. Вплив теплового дрейфу на сигнал ВОГ

Волоконно-оптичний гіроскоп викликав великий інтерес завдяки його перспективам для використання в системах навігації, стабілізації і управління. В той же момент, розробка ВОГ і створення функціоналу для нього вимагає вирішення низки проблем, що зв'язані із чутливістю до різного роду шумів, паразитним діям, які призводять до зниження точності вимірів. Такими проблемами можуть бути впливи температурного нестационарного поля, змінні поля електричної та магнітної природи, акустичні вібрації і шуми і т.д. Особливу увагу приділяється впливам, які викликані тепловими впливами. Як показують експерименти, незначні температурні впливи породжують фіктивні значення пристрою, а часто і взагалі зміну показів ВОГ. Основним елементом, який грає роль у цьому є датчик чуттєвості, де розміщений оптоволоконний контур[10].

Вирішення проблеми підвищення точності гіроскопа можлива кількома способами. По-перше, це сучасні технології виготовлення як волокна ВОГ, так і його елементів, при цьому основна увага приділяється чутливим елементам та їх конструкції: укладка волокна, матеріал для виготовлення волокна, матеріали шумо-, тепло-, віброізоляції. По-друге, варіант вирішення часто пов'язаний із моделюванням фізичних і математичних поведінок пристрою, в закономірних умовах потрібного процесу, а також створення алгоритмів корекції і прогнозу зовнішніх дій, що індуковані фазовою невзаємністю[11].

### 3.2. Розбір і апробація вже існуючих систем компенсації дрейфу

Одним із підходів до моделювання є розробка і апробація моделі, що покаже зміну показників ВОГ, викликану впливом різної природи чинників на датчик чутливості.

Суть наступна: контур знаходиться під тепловим нестационарним впливом, наприклад зміна температури навколишнього середовища, різниця фаз може виникати навіть якщо контур не обертається, так як характеристики оптико-механічних показників залежать від температури. Термічна індуктивність або фіктивна кутова контурна швидкість з'являється за наступною схемою: в одному і тому ж елементі по довжині оптичного нерухомого контуру є точка, де промені, що поширюються в зустрічних напрямках зустрічаються в різні моменти часу. При зміні показника заломлення кварцового волокна світлові промені здатні проходити елементи волокна із різною швидкістю, що призводить до зміни оптичних шляхів і відповідно до різниці фазового набігу  $\Delta\phi$ .

Показник, що характеризує заломлення є функцією температури  $K_0(T) = \Omega_{\text{вих}}$ , також він залежить деформацій під час напруги світлопровідної жили. Як правило це представляється у вигляді фотопружного (п'єзооптичного ефекту), тобто коли середовище стає частиною оптичної анізотропії, тобто ізотропія переходить в анізотропію. Коли не має узгодження каркаса котушки і оптоволоконного контура виникають теплопружні вібрації, що призводить до деформувань. Також можливий варіант подовження волокна при нагріві, за рахунок того, що коефіцієнт розширення також призводить до зміни різниці оптичних шляхів зустрічних променів. Тобто, якщо ми хочемо отримати інформацію про термічне зміщення ВОГ, потрібно в першу чергу враховувати динаміку зміни поля, а також зміну стану датчика чутливості. Цей механізм і буде визначальний при створенні математичної моделі даного явища.

Дані математичної моделі можуть формувати залежність зміни показника заломлення світлопровідної жили по всій довжині контура. Так як осьова симетрія має лінійний характер – ми можемо враховувати зміну показника витка за витком, враховуючи його довжину[11].

де  $x$  — координата, що лежить вздовж оптичного контура,  $n'$  — похідна, або швидкість зміни  $n$ , що визначається числовими деформаціями по часу;  $t^c$  — проходження променя за час через оптичний контур.

Згідно із цими даними і даними довжини хвилі фазовий набіг буде визначатися:

Фіктивна кутова швидкість при цьому буде визначається за формулою де  $s$  – світло, що поширюється у вакуумі,  $k$  - число хвиль,  $S_B$  – площа волокна із сумарною кількістю витків.

На рис.3.1 показано як змінюється результат температурного зміщення при нагріву до температури  $T = 60^\circ\text{C}$  протягом 50 хв, в порівнянні з показниками гіроскопа в натуральних умовах[12].

Рис.3.1. Графік температурного зміщення при  $T=60^\circ\text{C}$

З графіка видно, що на якісному рівні йде узгодження розрахункового і експериментального дрейфу, тобто динаміка змін у часі однакова. Видно, що максимальний дрейф припадає на початковий етап нагріву, коли зміна температури максимальна, далі температурний градієнт зменшується, але шляхом неузгодженої деформації контуру і металічного каркаса котушки він продовжує залишатися великим, через те, що коефіцієнти теплового розширення цих двох елементів різні. Низку

кількісних неточностей можна також пояснити неправильною укладкою контуру і низкою невірних числових значень.

На рис 3.2, представлений можливий механізм виникнення невзаємності фази, де основна інформація визначається функцією  $dT/dt$  і напруги, залежності від довжини волокна  $L$ . Цей механізм зображений для датчика чутливості в порядку укладки витків контура в момент часу, що дорівнює максимальному значенню дрейфу. Графіки показують неоднорідність по довжині волокна всіх характеристик і умов поляризації. Це власне і формує фазовий зсув, графік якого представлений на рис.3.3. Якщо дивитися на праву або ліву половину контура, то знаки будуть протилежні, а відповідно і значення дрейфу в середині буде рівне нулю. Результат в даному випадку визначає асиметрія графіку, тобто інтегралу фазового набігу по виткам, враховуючи знак[13].

#### Рис 3.2. Механізм виникнення невзаємності фази

Даний процес є дуже складний в обчисленнях, так як єдиний варіант для спрощення лежить у виключенні фотопружних ефектів, тобто з урахуванням тільки температурної залежності показника заломлення. Але це не дало бажаних результатів, так як значення дрейфу експериментального не збігалося із розрахунковим.

Тому дана комп'ютерна модель використовується більше для аналізу умов виникнення термічної індуктивності фазової невзаємності. Також вона показала хороші результати і в числових експериментах по оцінці конструктивних рішень для зменшення дрейфу[14].

#### Рис.3.3.Графік неоднорідності по довжині усіх характеристик

Наступною умовою яка показує виникнення дрейфу є зміна показника заломлення світлочутливої жили в умовах нестаціонарного поля термопружних вібраціях в витках оптичного контуру ( п'єзооптичний ефект). В попередньому методі показується можливість моделі в умовах нестабільності теплового стану обчислювального блока, тобто відбувався розрахунок рівнянь термофотопружності. Як ми побачили вище, модель дає адекватний прогноз термічноіндукованого дрейфу показників ВОГ. Але так як методика вимагає величезної кількості розрахунків і високої відповідності даних, то вона є досить непрактична. Тому запропонований абсолютно інший метод.

В даній методиці використовується числова диференційна модель, яка описує покази гіроскопа в нерухомому стані, але за умови коли контур є нестабільним по температурі. Для того, щоб зменшити трудомісткість обчислень фактор фазового набігу визначається лише тепловим збільшенням довжини світловода, а також показником заломлення волокна без врахування фотопружності і його відповідних ефектів. Дана методика базується на послідовних температурних впливах, тобто на великій кількості послідовних значень «одиначного дрейфа».

Алгоритм наступний: зміна температури поверхні датчика оптоволокна визначається шляхом послідовного числового диференціювання[15].

де  $i = 1, 2, 3 \dots$  - номер розбиття по часу з кроком  $h_k$ .

Після цього ми формуємо прогноз, який базується на дрейфі викликаному температурним нагрівом, у вигляді великого масиву значень одиничного дрейфу.

Відносно поточного моменту ми формуємо вибірку із моментів, які потім сумуємо, тобто формуємо суму всіх попередніх прогнозів для одного моменту. Алгоритм наступний:

Простіше кажучи, якщо просумувати елементарні прогнози для  $N$  моментів, які є попередніми моментами часу, то можна розрахувати тепловий дрейф для кожного моменту  $T_i$ :

В цьому розрахунку опором котушки каркаса ми нехтуємо. Варто сказати, що дана методика може застосовуватися і для кінцевої теплової провідності каркаса, тільки відбуватися певне запізнення на зовнішній температурний вплив, що буде продемонстроване в масиві одиничного дрейфу. Переходячи до практичного застосування можна підмітити, що математичне моделювання є неефективним через відсутність даних для розрахунку низки аспектів: дефекти укладки, характеристик матеріалів конструкції, також того як укладене оптоволокно. Тому одиничний дрейф формують

наступним чином: на етапі калібрування визначається експериментальним шляхом реєстрація неприривного дрейфу разом із реєстрацією температури поверхні датчика чутливості. Тому дана методика передбачає врахування індукційних особливостей виготовлення екземпляра блоку оптоволокна (крім термоіндукованого зміщення ВОГ) [15]. Практична апробація представлена на рисунку 3.4. Перший графік показує саме динаміку зміни температури датчика, при постійному циклічному зміні температури від  $-40...+60$  °С. Наступний рисунок показує кінцевий варіант зміни температури оптичного блока. Останній рисунок це обробка сигналу через фільтр при нерухомому положенні ВОГ.

Рис.3.4.Практична апробація параметрів датчика температури

З графіка видно, що гіроскоп поводитися відповідно до механізму виникнення дрейфу. Коливання фіктивної кутової швидкості були від  $-0,6...1,0$  °/ч. Калібрування гіроскопа зайняла в часі 15,6-16,1 год. Коли температура датчика збільшилася від  $-37$  до  $0$  °С(вертикальна лінія на рис.3.4). Після обробки сигналу було сформовано калібрувальний масив одиничного дрейфу. Компенсація теплових впливів представлена на рис 3.4,в і 3.4,г, звідки можна сказати, що числовий прогноз дрейфу дав можливість знизити термічне зміщення гіроскопа в 3-5 разів. Це говорить про ефективність даної методики[14].

### 3.3.Розрахунок і побудова графіків реакції ВОГ на тепловий дрейф волокна

Різний ступінь деталізації – це основа, що лежить в математичних моделях ВОГ різних авторів. Запропонований метод базується на моделі поведінки гіроскопа при впливі механічних і теплових факторів. Основна задача моделювання це вирішити проблему краєвих задач диференціальної термопружності і п'єзооптики.

Рис.3.5. Схема чутливого елемента ВОГ

Схема комп'ютерного моделювання представлена у вигляді січення катушки оптоволоконного датчика (рис.3.5). Вісь чутливості обов'язково має збігатися із горизонтальною віссю ВОГ. Кварцове волокно займає основну частину розрахунків, що навитий на металічний каркас(1) і залитий компаундом сполучення(2). Кварцове волокно(4) йде разом із шаром захисту і щільності ззовні(3). Світлопровідна легована кварцом жила(5) є місцем подання інформаційного сигналу. Відмінності даної моделі наступні: всі диференціальні задачі розрахунку термопружності і термовібрацій датчика чутливості реалізуються в спеціальному пакеті програм STAR-CCM; ми не нехтуємо динамічним п'єзо ефектом(викликаний дією зовнішніх впливів) в якості причин виникнення дрейфу, а окрім нестабільності теплового стану світловода ми враховуємо і цей фактор. На рівні постановки краєвих умов ми моделюємо у вигляді відповідних сил зовнішній вплив, який прикладається до розрахункових ділянок; на рівні постановки задачі ми відмовилися від представлення моделі ВОГ у вигляді квазіоднорідно середовища, для того щоб правильно описати стан термічних напруг масива. В даній роботі оптоволоконний масив ми розглядаємо як мікрорегулярне неоднорідне середовище, де елементи є рівномірно повторюваними однорідними ізотропними частинками. Це робиться для підвищення якості розрахунків. Перший етап модулювання це дискретизація розрахункової схеми. Завдяки тому що пакет програм STAR-CCM+ орієнтований саме на інженерних розрахунках, то процедура побудови дискретної моделі є дуже точною. Найбільшою проблемою моделювання є саме витки, так як їх кількість може становити декілька тисяч. Тому важливим був етап автоматизації процедури побудови різницевої сітки із забезпеченням її коректності: спочатку дискретизуємо мінімально повторювальний елемент (рис.3.6 а). В нашому випадку це два коаксіальні об'єкта круглої форми, які вписані в квадрат. Круг в центрі відповідає поперечному сеченню кварцового волокна, а кільце яке охоплює його ззовні це захисний ущільнювальний полімер, який захищає від механічних пошкоджень. Периферійна область заповнена компаундом фіксації, який займає міжжитковий простір оптоволокна. Даний фрагмент це область із трьох частин, де центральна світлопровідна жила із однорідних ізотропних матеріалів відповідає усім

термомеханічним вимогам. Визначення того як змінюється температура саме в центральній точці світлопровідної жили і є основною задачею[15].

Рис.3.6 Схема послідовної дискретизації

На рис.3.6 б зображений шар укладки, а повторювальна кількість шарів складає різницю моделі всього оптоволоконна(рис.3.6 в). В даній роботі було оптимізовану дану процедуру спеціальними java-макросами. Отримана кінцева модель чутливого датчика може бути використана для нестационарних полів температури і компонентів вектора вібрацій всіх елементів області. Зовнішнім впливом на ВОГ є саме механічний вплив, який розраховується відповідно до положень п'єзооптики. Суть заключається в отриманні інформації термопружності для центральної точки кожного витка контура, а також інформацію про швидкість зміни температури по якій розраховується показник заломлення світловода. За допомогою цієї інформації ми формуємо контур з врахуванням витків та їх укладки в датчику чутливості. В кінці вирішується задача поширення двох зустрічних світлових хвиль з врахуванням змінної швидкості їх поширення. Розраховується фазовий набіг  $\Delta\phi$  і час проходження кожним променем і визначається дрейф у вигляді фіктивної кутової швидкості  $\Omega$ . Нижче показані графіки апробації моделі ВОГ в нерухомому стані. Рис.3.7 показує динаміку температурного впливу, після якого температура поверхні плавно збільшується на 2 градуси протягом 1 секунди часу. Рис.3.8 показує у вигляді точок реакцію ВОГ на зміну температури. Можна сказати, що пік фіктивних значень кутової швидкості припадає на період максимальної динамічної зміни температури і з постійним зниженням по мірі того як контур прогрівався[17].

Рис.3.7 Динаміка нагріву поверхні каркаса

Рис.3.8 Розрахунковий тепловий дрейф ВОГ

На рис.3.10 показані розрахунки поведінки моделі при механічному ударі. Вони показують, що модель веде себе адекватно. Рис.3.9 демонструє амплітуду прикладеного точкового удару( в нашому випадку це 10g)

Рис.3.9 Динаміка прикладеної сили при ударі.

Рис.3.10. Розрахунковий дрейф при ударі.

Можна сказати що на першому пів періоді дрейф досягає максимуму коли швидкість збільшення температури максимально і має додатній знак. Як тільки інтенсивність навантаження зменшується знак може змінюватися на протилежний. Це зв'язано із появою розтягувальних напруг в масиві оптоволоконна. Як тільки ми знизили напруження до нуля то і «фіктивна» кутова швидкість поступово зменшилася до нуля.

Наступним кроком є модернізація даної моделі із врахуванням температурного зміщення і просторових температурних градієнтів.

Можна використати наступну модель для розрахунку величини  $\Omega_{пр}$ :

При розрахунку коефіцієнтів  $K_1^{\pm}$  та  $K_2^{\pm}$  будуть відрізнятися на ділянках стрибкоподібного зменшення і збільшення температури. Перший доданок в першому виразі це статичне зміщення нуля ВОГ.

Коефіцієнт буде визначатися на ділянках з відмінною тепературою, де відсутні похідні Динаміка змін температурного поля показана як другий і третій доданок похідних від температури і від часу. Ці величини величини виступають як теплоінерційні властивості конструкцій самого оптоволоконного датчика. В кожний момент часу похідні будуть мати наступний вигляд[17]:

де  $i$ - індекс моменту часу,  $H$ - це часовий інтервал через який записують результати в момент випробувань

Для розрахунку коефіцієнтів будемо користуватися наступними співвідношеннями:

Наступним кроком буде апроксимація лінійною функцією і параболічною функцією,

сплайнами. Числова корекція буде мати наступний вигляд:  $\Omega_{кор} = \Omega_{вих} - \Omega_{пр}$ , де

$\Omega_{пр}$  при цьому буде отримана після отримання значень коефіцієнтів в кожний момент часу.

На рис.3.11 наведені результати синхронного детектування температури і термоіндукованої кутової швидкості під час того, коли зразок піддають впливу діапазону



температури від  $-50 \dots 60$  °C зі швидкістю зміни  $1$  °C/хв. Так як вихідний сигнал містить велику кількість шумів, то на його фоні показаний відфільтрований сигнал, який усереднений по  $100$  значень із часовим інтервалом запису. Нерухомий гіроскоп при цьому видає амплітуду в  $1,0$  °/ч.

Рис.3.11. Результат синхронної реєстрації температури і термоіндукції  
Рівень дрейфа термостабілізації фіксується при температурі  $60, 20, -50$  °C, апроксимація параболічна. Ці значення визначають  $K_0(T)$  (статичне зміщення пристрою). Результат наведений на рис.3.12.

Рис.3.12. Рівень дрейфу, що визначається різними значеннями температури

Рис.3.13. демонструє результати апроксимації коефіцієнтів результати залежать від зміни температури. Рис.3.14. характеризує апроксимацію коефіцієнтів

Рис.3.13. Результати апроксимації перших похідних.

Рис.3.14. Апроксимація другої похідної

Дана методика проявила себе як одна із найефективніших і показала наступні результати: рис 3.15, де показаний вихідний дрейф (відповідає рис.3.11) і дрейф розрахований по даній методиці (Ω<sub>кор</sub>).

Рис.3.15 Порівняння вихідного дрейфу (рис.3.11) і розрахованого по даній методиці (Ω<sub>кор</sub>) [18].

**Висновок:** В даному розділі продемонстровано апробацію і розбір існуючих систем компенсації теплового дрейфу на вихідний сигнал ВОГ, а також побудовано графіки і порівняно результати експерименту і реального моделювання. Можна сказати, що модель на якісному рівні реагує на зовнішні впливи як теплової так і механічної природи. Варто сказати, що дані можна використовувати тільки для якісних цілей, так як вони носять попередній характер з ціллю зниження трудоемкості розрахунку і спрощення конструкції датчика. Дана методика дозволяє суттєво знизити фіктивну термоіндуковану кутову швидкість. В даному випадку дрейф був знижений майже в  $10$  разів (із  $1,68$  °/ч до  $0,19$  °/ч). Наступним етапом є масштабний обчислювальний експеримент з детальним описом оптичного блока. Це буде проводитися для того щоб якісно оцінити точність моделювання дрейфа шляхом його порівняння з експериментом в термокамері, або у вібростенді.

#### 4.Методи виготовлення оптоволокна

Існує багато методів виготовлення оптичного волокна. Виготовлення на початковому етапі складається із використанням преформи або з безпосереднім виготовленням волокна.

Застосування методів на основі екструзії є найбільш дієвими при виготовленні пластикового оптоволокна, в той час як прямі методи на основі преформи дають волокно найвищої якості.

##### 4.1 Виготовлення волокна з використанням преформ.

В баштах для витяжки, які досягають висоти кілька десятків метрів виготовляють оптоволокно з так званих преформ (заготовок). Преформа - це скляний стрижень завдовжки приблизно  $1$  метр і діаметром від  $1$  до  $10$ . Область з збільшеним показником заломлення розташована уздовж осі преформи (заготовки), серцевина волокна буде формуватися з неї. З нижньої частини заготовки буде виведено тонке волокно в момент коли заготовка нагріється до температури близької до температури плавлення в печі вежі волоконформування. В процесі витягування діаметр волокна залишається незмінним, а довжина може досягати кілька кілометрів. Стабільність діаметра волокна можлива за рахунок автоматичної швидкості витягування та температури в печі зворотнього зв'язку що контролює товщину волокна.

Для хімічного та механічного захисту волокно покривають полімерним покриттям, яке складається з двох або більше різних верств для оптимального зменшення мікровигинів. Для покриттів як правило застосовують акрілат, полімід і силкон, а для додаткового захисту можливе покриття зроблене шляхом екструзії після закінчення технологічного процесу.

Імпульсний ультрафіолетовий наносекундний лазер застосовується для створення брегівської решітки, лазер висвітлює волокно перед тим як воно буде покрито захисною оболонкою через фазову маску[19].

#### 4.2 Виготовлення преформ для волокна методом хімічного осадження з газової фази

Метод хімічного осадження з газової фази також використовують для виготовлення преформ (заготовок). Тут суміш кисню, тетрахлорида кремнію ( $\text{SiCl}_4$ ) і, можливо, інші речовини (наприклад, тетрахлорида германію ( $\text{GeCl}_4$ ) і рідкоземельні елементи проходять через обертові трубки кварцового скла, яке нагрівається до  $\sim 1600^\circ\text{C}$  в полум'я. Шаром кварцу, що формується хімічними реакціями в газі покривають внутрішню поверхню скляної трубки пальника і спікають в прозорий шар скла. До того як трубку спікається при температурі  $2000^\circ\text{C}$  газова суміш покриває шар і робить його із більшим показником заломлення ніж показник заломлення попередньої серцевини волокна.

#### 4.3 Різні альтернативні методи осадження з газової фази

1) OVD, або так званий метод хімічного осадження з газової фази – це процес в основі якого лежить осідання кварцу не всередині трубки, як з MCVD, а на поверхні оправлення скла (стержень). В паяльник попадає паливний газ разом із вихідним матеріалом ( $\text{SiCl}_4$ ). Паяльник рухається разом із обертанням стрижня, а після осадження і віддалення стрижня. Заготовка рухається в піч для продувки газом. За основу продувки беруть процес зниження гідроксилу.

2) Метод осадження з газової фази уздовж осі (VAD) аналогічний OVD, але з використанням зміненої геометрії, в якій осадження відбувається в кінці процесу виготовлення стрижня. Перевагою метода є можливість створення довгих заготовок, за рахунок зміцнення матеріалу в рамках окремого процесу зонного плавлення. Зміна газової суміші з плином часу формує відмінність між OVD і MCVD: профіль легування визначається тільки геометрією пальника.

3) PCVD або плазмове хімічне осадження з газової фази – використання осадження усередині трубки, так само як і при MCVD. Осаджені області підігрівають за допомогою мікрохвильових печей. Паяльник не використовується. Процес дуже повільний, але забезпечує високу ретельність. Метод має модифікацію у вигляді метод імпульсного хімічного осадження з газової фази (PICVD), а також покращений метод плазмове хімічного осадження з газової фази (PECVD). PICVD використовує лише короткі мікрохвильові імпульси, а PECVD працює при атмосферному тиску, швидкість напилення при цьому дуже висока[20].

4) POD, або зовнішнє плазмове осадження використовують для волокон із великою серцевиною, де зовнішній легований шар формує оболонку волокна, що зроблена плазмовим пальником. Зовнішній легований шар із серцевиною із будь-яких домішок, частіше із кварцу є шаром із зменшеним показником заломлення.

Методи хімічного осадження мають суттєву перевагу: можна досягти надзвичайно низьких втрат поширення, менших  $0,2\text{ дБ / км}$ , так як використовуються високоякісні матеріали з відсутністю забруднення. Такі матеріали як  $\text{SiCl}_4$  і  $\text{GeCl}_4$  очищують шляхом дистиляції, тому що за кімнатної температури вони є рідкими. Якщо в якості паливного газу виступає не водень і вміст води є дуже низький, втрати можуть бути на рівні  $1,4\text{ мкм}$ . Це впливає на якість телекомунікаційного зв'язку[20].

#### 4.4 Методи виготовлення преформ без осадження з газової фази

Метод осадження з газової фази не завжди можна використовувати, особливо в ті моменти коли заготовки складаються з різних матеріалів. Тоді використовується метод rod-in-tube technique, або метод складання преформ з різних матеріалів. Стрижень зі скла з великим коефіцієнтом заломлення вставляється всередину трубки з меншим коефіцієнтом заломлення. Коли відбувається нагрівання, частини паралельно цьому спікаються в обох частинах.

Також можливе наповнення трубки, що є заготовкою для оболонки волокна, тобто розплавом скла із меншим коефіцієнтом заломлення.

Дуже часто заготовки для фотонно-кристалічних волокон виготовляють шляхом укладання капілярних трубок або стрижнів, як правило із чистого кварцового скла. Дані заготовки містять отвори по всій довжині і в них вводяться рідкоземельні леговані **стрижні** для пристроїв із активного волокна.

#### 4.5 Адаптовані методи для пристроїв на основі активних волокон

Волоконні лазери і волоконні підсилювачі, або пристрої з активного волокна потребують рідкоземельні леговані волокна. Тут, волокна серцевини леговані рідкоземельними **іонами ербію**, неодиму, **ітербію**, або **тулія**. Додаткові домішки покращують розчинність для рідкоземельних **іонів**, змінюють світлочутливість, в також змінюють показник заломлення. Для методу хімічного осадження з газової фази можна використовувати не всі домішки зокрема прекуртори для **рідкоземельних** домішок містять дуже великий тиск фази при конвективному переносі матеріалу. Дану проблему вирішують підведенням більш високої температури до джерела рідкоземельних іонів. Додаткові ділянки з домішками або кварцом можуть міститися в скляній трубці, яка просочена рідкоземельною сіллю, яка нагрівається з додатковою пальника. Це допустимо при MCVD методі.

Поширеним методом є також нанесення на внутрішню сторону порожнистої трубки кварцу кремнієвого фрита. Даний фрит не має рідкоземельних іонів і просочується розчином, де міститься хлоридна сіль. Сухий і тонкий шар рідкоземельного оксидного заготовки додатково обробляють. Альтернативою виступає напилення наночастинок з допомогою деяких аерозолів. Завдяки цьому методу створюється допирування профілю і досягається висококонцентрований шар легування з хорошою однорідністю[20].

#### 4.6 Методи виготовлення без застосування заготовок

Характерним методом виготовлення м'яких скляних волокон є метод подвійного тигля. Тигель складається із резервуара для плавлення **серцевини** зі **скла**, декілька резервуарів для скління і невеликий отвір в центрі, де серцевина і оболонка одночасно **створюються** з тигля. Даний метод є давнішим в порівнянні з методом хімічного осадження з газової фази, він як правило використовується для м'якого скла, так як краще пристосований для створення різних матеріалів зі скла. Через те що важко уникнути забруднення матеріалу з тигля, можливі великі втрати. Це унеможливає використання даного методу для отримання надчистих волокон із низькими втратами.

Для пластикових волокон застосовують метод простої екструзії, що сам по собі подібний до метода подвійного тигля. Дані волокна призначені для масового виробництва, хоч і не мають високого рівня якості[20].

**Висновок:** в даному розділі запропоновані різні методи виготовлення оптоволокон, а також запропоновані основні переваги і недоліки кожного методу. Можна сказати, що найбільш поширеними є методи на використанні преформ, так як вони дають оптоволоконно найвищої точності, в той час як методи засновані на екструзії, використовуються в основному для виготовлення пластикового оптоволоконна. Саме виготовлення преформ ділиться на: хімічне осадження з газовою фазою, без осадження газовою фазою і методи на основі активних волокон. Зокрема використовується також метод без застосування заготовок, але він не придатний для виготовлення волокна з низькими втратами.

### 5. Верифікація математичної моделі теплового дрейфу ВОГ

#### 5.1. Розробка моделі ВОГ на основі волокна Panda

Відомо, що світло в гіроскопі поширюється по жилі кварцового оптичного волокна (рис. 5.1, а). В даній роботі я використовую кварцове одномодове волокно *Panda*, що покриті двома покриттями для захисту і ущільнення. Метод намотування – квадрупольний, функцію зв'язувальної рідини бере на себе епоксидний компаунд (рис. 5.1, б).

Рис. 5.1. Контур ВОГ (а) і його поперечне січення (б)

Кварцове волокно типу панда має структуру із оболонки, жили і силових стержнів. Коли волокно піддається процесу витяжки, стержні формують напружені поля в жилі світлопровідності. Це забезпечує різні коефіцієнти заломлення у взаємно перпендикулярних площинах( двоприменезаломлення). Тип волокна «Panda» має швидку XOZ і повільну

YOZ ортогональну площину. Світло поширюється вздовж однієї із них. Схема волокна наведена на рис 5.2.

Рис.5.2. Програмна модель оптоволокна

Світлова хвиля довжиною  $\lambda_{sv}$ , яка проходить по волоконній жилі довжиною  $L$  з коефіцієнтом заломлення  $n$  (площина XOZ) має вигляд:  
Фаза буде змінюватися відповідно до поширення світлової хвилі вздовж волокна, якщо температура буде змінюватися відповідно до  $\Delta T$ [20–24]:

коефіцієнт який покує як жила температурно розтягується,  $\frac{dn}{dT}$  - коефіцієнт

термооптичний

Відповідно вираз, що буде показувати фазу, з врахуванням показника заломлення і температури буде мати вигляд[18]:

Зміна фази світлової хвилі, що рухається в жилі з врахуванням зміни пружних деформацій  $\Delta \epsilon$  буде визначатися як :

Зміна довжини, фази і показника заломлення при дії пружних деформацій відповідно[19]:

Зміна фази від пружних деформацій після підстановки буде мати вигляд:

Затримку по часі двох світлових хвиль що поширюються можна визначити за формулою

Зміна температури і пружних деформацій за час пробігу :

Після підстановки можна записати вирази для кутових швидкостей, де швидкість зміни температури і деформації в волокні визначає зміну довжини і коефіцієнта заломлення:

Останні формули дають змогу розрахувати будь яку кутову швидкість BOG, якщо знати як розподіляються параметри  $T$ ,  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{zz}$  в жилі в кожний момент часу[25].

Будемо мати на увазі, що оптичні характеристики жили як і матеріал є постійними і розглядаються в відповідних нам значень констант:

Для чисельного розрахунку задачі використовуємо програму ANSYS. Був вибраний елемент PLANE223, який враховує симетрію, квадратну апроксимацію функцій форми і має три ступені вільності. Так як термпружність вирішується в циліндричній системі ( $r, \phi, z$ ), а математична модель подана в декартовій системі ( $x, y, z$ ), відповідно всі інші результати будуть йти в локальній системі координат програми.

Температура буде змінюватися із 20 до 60 °C, швидкість зміни 1°C/хв при максимальному значенні буде утримування на хв. Залежність швидкості зміни температури від час показано на рис 4 Можна побачити найбільшу зміну температури в період від 0 до 5 і від 40 до 45 хв, тобто в період максимального розгону і гальмування. Часовий діапазон від 35 до 40 хв відзначається однорідністю по всій довжині.

Рис.5.3. Залежність швидкості зміни температури вздовж волокна від часу

Рис.5.4. Залежність деформації  $\epsilon_{xx}(1)$ ,  $\epsilon_{yy}(2)$ ,  $\epsilon_{zz}(3)$  і  $-\nu\epsilon_{zz}(4)$  від довжини волокна

Варто підмітити, що первинне покриття волокна є дуже податливим, як наслідок напруги в січенні дуже малі і ними можна нехтувати, в порівнянні із повздовжньою компонентою.

Якщо прийняти, що  $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 0$ , то співвідношення буде наступним:

Відповідно із (5.15) :

Після підстановки маємо спрощений вираз (5.16) в (5.8):

Сумарна кутова швидкість складає :

Залежність швидкості деформації  $\epsilon_{zz}$  від часу показана на рисунку: Деформація буде присутня протягом всього часу нагріву і максимально припадає на 40 хв.

Рис.5.5 Залежність показника деформація  $\epsilon_{zz}$  вздовж волокна від часу

## 5.2. Розрахунок теплового дрейфу

Після підстановки похідної зміни температури в вираз(5.6) і швидкості деформації  $\epsilon_{zz}$  в вираз (5.7) і (5.17) отримуємо графік кутової швидкості рис 5.6.

Видно, що дрейф який спричинений швидкістю зміни температури має форму що відмінна від компонента дрейфу, що викликана швидкостями деформації. Ділянки максимального розгону і гальмування формують максимальне значення по амплітуді. Компоненти дрейфу що викликані деформаціями, направлені по різному із різними амплітудами

Рис.5.6.Залежність кутової швидкості від часу для величин  $\Omega_{ДПЛ}(1)$ ,  $\Omega_{ДІЕ}(2)$  і  $i\Omega_{ДІЕ}(3)$   
Для експериментального розрахунку використовувалися існуючі значення 3 волоконних контурів. Їх ставили в спеціальне місце і нагрівали від 20 до 60°C. Швидкість зміни і витримки так ж як в теоретичному експерименті. Постійна, що викликана обертанням землі була виключена, сумарна кутова швидкість(5.18) що викликана ефектами термооптики, а також кутові швидкості представлено на рис.5.7.

Рис.5.7. Порівняння розрахункового і експериментального дрейфу  
Кількісна оцінка проводиться з допомогою відхилень, значення яких представлені в табл 2. На проблемних ділянках розгону і гальмування різниця не перевищує 6%, а ділянці від 5 до 40 хв похибка складає 13,2%, що формує загальну похибку в 10% по всьому приборі.

**Висновок:** За рахунок вирішення задач квазістаціонарності термопружності було отримано дані швидкості зміни температури і швидкості зміни деформації. Можливість порівняти тензора деформацій між собою і у вигляді конструкції дало змогу отримати показники дрейфу, що викликаний зміною показника заломлення від дії пружних деформацій, тим самим залишивши одну компоненту, що діє вздовж волокна. Амплітуда кутової швидкості, що викликана прожньооптичним ефектом, приблизно в 20 разів більша ніж термооптичним ефектом. Після побудови графіків і порівняння, можна сказати, що математична модель адекватно описує поведінку ВОГ, також може бути використана для оптимізування і конструювання пристроїв на базі ВОГ із мінімальним впливом дрейфу. Якщо не брати до уваги оптичних характеристик волокна і фізикоматематичні властивості матеріалів, то вірогідність правильності результатів збільшується.

6. Використання та перспективи виготовлення приборів на базі ВОГ

#### **6.1. Бесплатформені інерціальні навігаційні системи на основі волоконно-оптичних гіроскопів**

Визначити координати розміщення об'єкта в даний момент це основна задача навігації. Датчики дають повну інформацію для об'єкта на якому вони безпосередньо встановлені: координати, швидкість, прискорення( з допомогою акселерометрів), кутову швидкість( ДУС). Задачі, які виконують гіроскопи відносяться до інерціальної навігації. ІНС базуються на двократному інтегруванні вимірювань прискорень.

Навігаційні системи включають наступні аспекти:

- 1) Швидкість( $V_{x0}, V_{y0}$ ) і значення нульових( $x_0, y_0$ ) координат
- 2) Акселерометр, який отримує проекції прискорення об'єкта
- 3) Гіроскоп, який визначає розміщення вісі чутливості акселерометра відносно навігаційної СК.
- 4) Прискорення об'єкта двічі інтегрується по часу.

Після аналізу трендів і нових аспектів в розвитку гіроскопії в межах навігації (ІНС) для об'єктів ракето-космічної техніки (РКТ) можна сказати що відбувається перехід до комплексу командних приборів безплатформеної навігації( БІНС).

Навігаційні інерціальні системи використовуються в задачах рухомих об'єктів навігації. Завдяки можливості отримати повну інформації: координати об'єкта, кутах курсу руху, тангажа, крена, прискорення і швидкості руху, а також завдяки широкому діапазоні кутів, з високою точністю і з частотою видачі інформації в реальному часі, БІНС не мають альтернатив. Дані системи повністю автономні, чутливими елементами виступають ВОГ( волоконні гіроскопи) з контурами замкнутого зворотного зв'язку[26].

Використання БІНС передбачає жорсткі вимоги до датчиків кутової швидкості( ДУС ) і акселерометрів, які експлуатуються в некомфортних умовах використання( кріплення до корпусу приладу), з можливістю розширення діапазону вимірів і стійкості до перевантажень вібрації. Основні аспекти, що характеризують перспективні прибори це висока точність і надійність, мініатюрні габарити і невисока вартість експлуатаційних витрат. Другорядними, але не менш важливими критеріями є простота в конструюванні і шаблонна( відпрацьована) технологія виготовлення. Все це і формує широке застосування ВОГ в системах із датчиками кутових швидкостей ( ДУСах).

Важливим критерієм роботи на поверхності землі це можливість для акселерометрів вимірювати різницю прискорення об'єкта і можливість вимірювати гравітаційне прискорення. Сила інерції, тобто фіктивна сила, що викликана як правило вертикальним переміщенням тіла з гравітаційним прискоренням(g) відповідає реакції акселерометра на силу тяжіння землі. Після переведення осей чутливості в область горизонту можливе уникнення параметра g, але тільки за наявності платформи гіростабілізації. Наявність захисту гіроскопа від кутових переміщень не дає можливості уникнути мінусів, які зв'язані із ненадійністю як прецензійного приладу( велика маса, не проста зборка і високі витрати енергії). За останні роки відбувся перехід на уніфіковане кабельне виробництво, тобто створення загальних кабельних систем саме на базі ІНС Кабельні системи призначенні для керування рухом, а також для калібрування і виставки початкових координат бортових корабельних систем. В світі є не більше десяти крупних виробників навігаційних системи різного класа точності. Флагманом серед вітчизняних виробників є «НПК «Оптолинк», про який ми сьогодні поговоримо[26].

## 6.2. Волоконно- оптичні гіроскопи

**ВОГ компанії «Оптолинк»** виготовляються із замкненим контуром зворотного зв'язку, тобто із мінімальної конфігурації цифрової обробки сигналів. Мінімальна конфігурація це можливість для взаємності світлових хвиль, що рухаються назустріч один одному в волоконному контурі. На рис 1 показана одноосьової навігаційної системи із цифровою обробкою сигналів.

Рис.6.1. Структурная схема ОИУС с ЦОС: СЛД - суперлюмінесцентний діод, БУІ - блок управління випромінювачем, ВР- розгалужувач волокна, ВК - волоконний контур, МІОЕ - багатофункціональний інтегральний оптичний елемент, ПФП – пристрій фотоприйомний, ДП - деполяризатор, RS-485 - послідовний інтерфейс

Важливими складовими пристрою є джерело світла із довжиною хвилі в 1550 нм, 1-3 фотодетектора, 1-2 подільника світла, 1-3 інтерферометра, які чутливі до ортогональних кутових швидкостей і блок електроніки. Інтерферометр у формі кільця складається із низки інтегрально-оптичних елементів і із волоконного контура, що зберігає поляризацію світла, довжина якого 200,500,1000,2000 метрів залежності від потреб виробництва. Багатофункціональний оптичний елемент являє собою схему що розміщена на кристалі ніобата літія.

Експлуатаційні параметри ВОГ і параметри точності компанії «Оптолинк» в порівнянні із світовими виробниками приведені в табл 1. Важливо зауважити, що нульовий сигнала(Bias Instability), а точніше його дрейф і спектральна щільність шуму(Angle Random Walk) йдуть із розрахунком на метод Аллана.

### 6.2.1 Бесплатформені інерціальні навігаційні системи

Можливість видачі інформації в автономному( інерціальному ) режимі і в режимі в інтеграції із супутниковим приймачем стало ключовим фактором успіху видачі інформації в системах БІНС-500 (БІНС-500К, БІНС-500М) і БІНС-501[26].

Блок сервісної електроніки відповідає за управління всієї роботи ВОГ: від управління режимами роботи до обробки сигналу фазової модуляції). Аналогові сигнали, які є пропорційні прискоренню по ортогональним осям поступають на три канали 24-розрядного АЦП із трьох акселерометрів. Температурний датчик також формує сигнал АЦП. Інформація із датчиків кутової швидкості, прискоренні і температури обробляється обчислювальним пристроєм і видається в послідовний канал обміну БІНС. Обчислювальна система БІНС Вирішує задачі автономної виставки, орієнтації і навігації, а також обмінюється із зовнішніми пристроями по послідовних каналах.

Важливою складовою схеми є також приймач сигналів супутникової навігації. Він видає інформацію про швидкості супутників ГЛОНАСС і НАВСТАР. Це відбувається по послідовному каналі в цілях корекції інерційної системи. Якщо інформації такої немає то

спрацьовує автономний(інерційний) режим. Зовнішній вид і внутрішня структура прибору зображена на рис.3.

Рис.6.2 Зовнішній вид і внутрішня структура прибору БІНС-500К

Після серійних випробувань пристроїв БІНС 500 в статичних і динамічних умовах, в широкому діапазоні зовнішній взаємодій були отримані наступні цифри:

Точність визначення курсу  $<0.3^\circ$ (рис.4)

Похибка визначення координат в інерціальному режимі  $<10$  км/ч

Рис.6.3 Період перезапуску і початкова стабільність виставки пристрою БІНС-500К від запуску до запуску. Період 10 хв.

Лише для морських потреб в динамічних умовах компанія запустила БІНС-500М . Загальна схема представлена на рис.8.

Рис. 6.4 Загальна схема приладу БІНС-500М: БЦВМ –обчислювальна машина, що розміщена на борту, плата ДВВ – датчик вводу-виводу дискретних даних, ПМ – модуль процесора , PI - розширювач інтерфейсу, IP – плата інтерфейсу, ПС – схема узгодження, ВІП – вторинне джерело живлення , СП – приймач супутникового сигналу, ВСНС – Навігаційна супутникова система зовнішнього зв'язку. Характеристика БІНС( на ВОГ ), випущених компанією «Оптолинк», в порівнянні із світовими виробниками наведені в табл.6.2[25].

Хорошим прикладом системи БІНС є система «Бекар-Є». «Бекар-Є» дає можливість працювати в будь- яких широтах, також в широкому діапазоні температур(похибка  $45^\circ$ ). Головна перевага пристрою це можливість роботи без втручання людини і спец. обслуговування.

#### 6.2.2 Методи оцінки випадкових складових на БІНС

За ідеальних умов вихідний сигнал ДУСА залежить тільки від кутової швидкості і може бути виражений рівнянням  $W_{\text{вих}} \equiv K \times \omega + \omega_0$ , (1), де  $\omega_0$  і  $K$  – нульовий сигнал і масштабний коефіцієнт відповідно,  $\omega$  – кутова швидкість

В реальних умовах сигнал на виході ДУС може бути представлений як сукупність функцій кількох змінних: температури( $T$ ) , кутової швидкості( $\omega$ ) і прискорення( $a$ ) а також магнітних полів і випадкових складових  $W$

Математична модель похибок( МПП) дає змогу врахувати системність похибок в цільових умовах використання. Важливим є також фактор випадкового сигналу, тобто сигналу механічно чутливих елементів чи елементів схеми обробки сигналу. Для оцінки повного сигналу значень похибки недостатньо, але варіант розробки моделі випробувань і досліджень вихідної характеристики ДУС можливий, якщо оцінювати Wслуч

#### 6.3. Перспективи використання інерціальної навігаційної системи на вертольотах

Побудова навігаційних систем літальних апаратів(ЛА) , зокрема і вертольотів передбачає різні методи навігації. По методу визначення координат об'єкта вони діляться на три категорії[26]:

Метод обрахунку шляху

Образно-порівняльний метод

Метод ліній і поверхонь положення

Метод обрахунку шляху інтегрує в часі вимірювання швидкостей і прискорення і тим самим визначає координати місцеположення. Обрахунок шляху базується на основі доплерівських і інерційних методів навігаційних вимірів, а також аерометрики.

Метод ліній і поверхонь базується на визначенні місцеположення на даний час незалежно від розміщення гелікоптера . Даний метод неможливо використовувати без природного чи штучного навігаційного поля.

Образно-порівняльний метод заснований на порівнянні інформації із місцевості, що зафіксована на карті чи в системі пам'яті, з реальний(фактичним) видом місцевості, що спостерігається приборами чи візуально. Якщо відбувся збіг то об'єкт стає визначеним на місцевості.

Найбільш популярними є системи, що побудовані на основі ІНС по методу обчислення шляху. Дані системи є основою навігаційних систем сучасних вертольотів, так як вони автономні, не демаскують літак при їх роботі і є неперервними в роботі залежно від погодних умов.

Для систем ІНС основною характеристикою є чутливість, що визначається акселерометрами і гіроскопами. ІНС можуть бути платформними, або безплатформними залежності від наявності гіростабілізаційної платформи, де відбувається безпосередній зв'язок з об'єктом[27].

В БІНС блоки основних характеристик розведені, залежності від вимірювання вектора прискорення на блок акселерометра і блок гіроскопії.

Блок гіроскопів реалізується на борту інерційної системи відліку, це відбувається за рахунок вільних гіроскопів, або з допомогою вимірів кутової швидкості. В якості датчиків можна використовувати волоконні(ВОГ) і лазерні гіроскопи(ЛГ). Це підвищує надійність системи.

ЛГ використовується при перетворенні кутової швидкості і кута в інерційний простір основи чи об'єкта, де він розміщений. Як правило він дуже подібний до квантового генератора.

Лазерні гіроскопи використовують через високу чутливість і точність вимірів, можливість сполучення гіроскопа і ЕОМ( дискретна форма сигналу напряму вводиться в обчислювальну машину), невисоку потужність використання, миттєвий запуск, а також можливість для вимірів кута повороту основи на якій встановлений гіроскоп.

Основні характеристики даних систем:

Випадковий дрейф 0,001°/ч

Стабільність масштабного коефіцієнта - 10-5 одиниць

Готовність до запуску <1 секунди

Діапазон вимірювань швидкостей від 10-3 °/ч до 103 °/с

Невисока чутливість до перевантажень

На рисунку 6.5 представлена БІНС 2 варіанта конструкції

Рис. 6.5 . Принципова схема БІНС в системі вертольота

Можливість перетворення рухомої системи координат, що зв'язана із об'єктом в навігаційну систему, враховуючи початкові параметри, а також орієнтацію на місцевості за рахунок волоконно-оптичних датчиків є ключовою в у визначенні місцеположення гелікоптера і його параметрів.

**Висновок:** БІНС на базі ВОГ є лідерами в навігаційних системах на світовому ринку літальних апаратів. Завдяки високій точності і низькій ціні застосування систем є універсальним і охоплює повітряні, наземні і водні системи. Широкий клас пристроїв на ВОГ сформував тенденції до розвитку різних галузей конструювання і дав можливість запобігти впливу похибок , перевантажень і неточностей в роботі літальних систем.

#### **7. Startup проект моделі ВОГ із квадрупольною схемою намотування та мінімальним показником дрейфу**

Startup модель проекту передбачає аналіз низки критеріїв, які наведені в табл.7.1.

Ідея створення стартапу зародилася у зв'язку із неможливістю отримання розрахункових даних, що узгоджуються із експериментом. Це відбувається в умовах прямого чисельного моделювання, що ставило за мету оцінку величини теплового дрейфу під дією зовнішніх впливів. Головною причиною цього є наявність великої кількості випадкових дефектів, що пов'язані із неправильним вибором схеми і способу укладки оптоволоконна. Дослідження в стартап моделі полягає в оцінюванні ступеня впливу дефектів на покази гіроскопа під час дії нестационарних теплових впливів. Основою стартапу є комп'ютерна і математична модель для розрахунку теплового дрейфу, а також методика розрахунку. Суть розрахунку полягає у вирішенні задачі термопружності для регулярного мікронеоднорідного середовища із наявним оптоволоконним масивом в конструкції ВОГ. На основі обробки суті проблеми і отриманої інформації вирішується задача розрахунку термічно-індукованої



кутової швидкості при зміні температури від +20 до +60°C. Головною умовою є ідеальність волоконного контуру із бездефектною укладкою для співставлення із результатом моделювання дрейфу з врахування дефектів, що виникають на виробництві. Модель стартапу передбачає повний опис усіх існуючих дефектів, а також пояснення причин через які виникає дрейф.

Ключові переваги стартапу розробки квадрупольної схема над існуючими розробками:

Симетричність витків відносна центра дає можливість розміститися виткам щільно один до одного, тому на ділянках розгону і гальмування немає стрибкоподібної зміни кутової швидкості, яка викликана пружнооптичним ефектом. Фіктивна кутова швидкість є незначно, тому її вкладом в сумарний тепловий дрейф можна нехтувати.

Зміна кількості витків і слоїв за умови зберігання довжини і середнього діаметра контуру дає можливість знизити тепловий дрейф. Найкращим варіантом є використання схеми із 8 слоїв в комірці періодичності .

Завдяки перевероту контуру в с розробці є можливість краще передбачити поведінку контуру, а тим самим розрахунок алгоритму теплового дрейфу в вихідному сигналі ВОГ є простішою задачею.

**ВИСНОВОК:** запуск даної ідеї в серійне виробництво дасть можливість мінімізувати дефекти волокна за рахунок високого контролю на виробництві , а також мінімізувати тепловий дрейф за рахунок:

розміщення рівновіддалених від середини контуру ділянок щільніше одна до одної;

збільшення числа слоїв в комірці періодичності;

застосування схем із відсутнім чергуванням витків в шарі.

#### ВИСНОВКИ

Даний дипломний проект складається із наступних частин:

Огляд науково-технічної літератури

Принцип дії і паразитні спотворення корисного сигналу ВОГ

Тепловий дрейф волоконно-оптичного гіроскопа

Методи виготовлення оптоволокна

Верифікація математичної моделі теплового дрейфу ВОГ

Використання та перспективи виготовлення приборів на базі ВОГ

Startup проект моделі ВОГ із квадрупольною схемою намотування та мінімальним показником дрейфу.

В огляді науково-технічної літератури розглянуто основні конфігурації ВОГ, запропоновано опис їх конструкцій, а також наведено основні параметри, переваги і недоліки даного типу гіроскопів. Було встановлено, що критерії, які відповідають високоточним ВОГ наступні: цифровий, повністю замкнутий контур; оптичний модулятор повинний бути із ніобату літію, так як це дає можливість отримати високу поляризацію і коефіцієнт розсіювання; ширококутне джерело світла, довжина світла якого в середньому 1550nm; висока чутливість оптоелектронних детекторів; квадрупольна схема намотування, що дає можливість мінімізувати температурний дрейф шляхом ущільнення намотаного волокна.

Розділ « Принцип дії і паразитні спотворення корисного сигналу ВОГ» розглянуто основні ефекти на основі яких працює ВОГ, а також розглянуто основні похибки, які формують негативний вплив на сигнал ВОГ. Проведений розрахунок основних похибок пристрою на основі довідникових даних. Дані розрахунки показали, що значення похибок дробового шуму і температурних градієнтів є меншими на сім і чотири порядки відповідно, ніж значення шумів, що викликані зміною кута поляризації і релеевським розсіюванням.

Можливими варіантами зменшення впливу похибок: застосування одномодового волокна в якому зберігається поляризація, коефіцієнт загасання оптоволокна не менше 0.2дБ / км, встановлення поляризаційного фільтра в контурі, використання модулятора випадкової фази(декорелятора шуму зворотнього зв'язку)

Розділи «Тепловий дрейф волоконно-оптичного гіроскопа» і розділ Верифікація математичної моделі теплового дрейфу ВОГ містять апробацію і розбір існуючих систем компенсації теплового дрейфу на вихідний сигнал ВОГ, також було побудовано графіки і порівняно результати експерименту і реального моделювання. Встановлено, що за рахунок вирішення задач квазістаціонарності термопружності було отримано дані швидкості зміни температури і швидкості зміни деформації. Можливість порівняння тензора деформацій між собою і у вигляді конструкції дало змогу отримати показники дрейфу, що викликаний зміною показника заломлення від дії пружних деформацій, тим самим залишивши одну компоненту, що діє вздовж волокна. Амплітуда кутової швидкості, що викликана прожньооптичним ефектом, приблизно в 20 разів більша ніж термооптичним ефектом. Дана модель адекватно описує поведінку ВОГ, також може бути використана для оптимізування і конструювання пристроїв на базі ВОГ із мінімальним впливом дрейфу.

Розділи що містять методи виробництва оптоволокна і перспективи застосування ВОГ дають якісну картину стосовно того, які методи виробництва є найкращими і які галузі застосування є найбільш перспективними. Встановлено, що методи на основі преформ є найкращими, так як вони дають оптоволокно найвищої точності, в той час як методи засновані на екструзії, використовуються в основному для виготовлення пластикового оптоволокна. Зокрема використовується також метод без застосування заготовок, але він не придатний для виготовлення волокна з низькими втратами.

Серед галузей застосування варто відмітити авіоніку( безпілотні літальні апарати) та галузь конструювання вертольотів.

Стартап проект засвідчує актуальність даної дипломної роботи, показує варіанти майбутніх розробок, а також пропонує варіанти наступної модернізації пристрою із використанням різних методик контролю виробництва і укладки волокна.

Кінцевий варіант розробленої моделі показує що для створення конструкції точного гіроскопа потрібно оцінювати дрейф на момент проектування, тобто без математичної моделі поведінки ВОГ в умовах теплової дії необійтися. Наступним кроком є розробка моделі із відмовою від властивостей матеріалів і оптичних характеристик оптоволокна, що дасть змогу покращити результат.

Результати даного дипломного проекту можна використовувати для реалізації і подальшого серійного виробництва ВОГ .

