

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

РОЗРОБКА ЛАЗЕРНОГО ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ
КУТОВОГО ОБЕРТАННЯ ОБ'ЄКТІВ У ПРОСТОРІ
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ФТОІм-21-1
Сологуб М.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 Метрологія та
інформаційно-вимірjuвальна техніка»
(код і повна назва спеціальності)

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

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

Керівник зав. каф. ФОЕТ Гнатенко О.С.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)
Спеціальність _____ 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка
(код і повна назва)
Тип програми _____ освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма _____ «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Сологубу Миколі Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Розробка лазерного приладу для вимірювання кутового
_____ обертання об'єктів у просторі

затверджена наказом університету від « 04 » листопада 2022 р. № 1444 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 19 _____ грудня _____ 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи _____ Склад та конструкція сучасного волоконно оптичного гіроскопа
та особливості його збірки, намотка оптичного волокна, алгоритми обробки сигналів,
модуль обробки сигналів.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Огляд сучасного стану волоконно-
оптичних датчиків кутової швидкості. 2 Опис основних конструкторських рішень
гіроскопа та технологічних особливостей виготовленн\ ВОГ. 3 Опис основних
алгоритмів обробки сигналів модулем 3 та протоколу обміну даних . 4 Якість намотки
чутливого елементу волоконно-оптичного гіроскопу. 5 Дефекти намотки оптичного
волокна на котушку

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

Демонстраційний матеріал – 14 шт. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про волоконні гіроскопи	01.09.22–20.09.22	Виконано
2	Дослідження фотонного гіроскопа	21.09.22–06.10.22	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик фотонного гіроскопа	07.10.22–25.10.22	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів фотонного гіроскопа	26.10.22–7.11.22	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	08.11.22–30.11.22	Виконано
6	Оформлення демонстраційного матеріалу	01.11.22–05.12.22	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	06.12.22–14.12.22	Виконано
8	Проходження перевірки на плагіат	15.12.22–16.12.22	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	17.12.22–20.12.22	

Дата видачі завдання 01 вересня 2022 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 73 с., 28 рис., 5 табл., 1 додаток, 40 джерел.

ГІРОСКОП, ДАТЧИК КУТОВОЇ ШИВДКОСТІ, МІКРОКОНТРОЛЕР,
РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОНИХ ПРИСТРОЇВ, ФОТОНІКА, ОПТИЧНЕ
ВОЛОКНО.

Мета роботи – огляд роботи волоконно оптичних гіроскопів та розробка конструкторської документації для виготовлення зразка.

Об'єкт дослідження – волоконно оптичні гіроскопи.

Предмет дослідження – основні властивості волоконно-оптичних гіроскопів та технологічні особливості їх виготовлення.

Мета роботи – огляд роботи волоконно оптичних гіроскопів та розробка конструкторської документації на виготовлення зразка.

Метод розробки – аналіз джерел та проведення практичного дослідю.

У роботі було описано основні властивості та алгоритми роботи оптичного гіроскопа та обробка оптичних сигналів.

У ході проведених досліджень було опрацьовано дані, отримані при намотуванні волоконних контурів, виявлено основні дефекти намотування, а також визначено вплив кроку укладання на параметри якості. Було встановлено, як дефекти намотування впливають на роботу пристрою.

ABSTRACT

The explanatory note of the master's thesis contains: 73 pages, 28 figures, 5 tables, 1 supplement, 40 sources.

GYROSCOPE, ANGULAR VELOCITY SENSOR,
MICROCONTROLLER, DEVELOPMENT OF ELECTRONIC DEVICES,
PHOTONICS, OPTICAL FIBER.

The object of the research is fiber optic gyroscopes.

The subject of the research is the main properties of fiber-optic gyroscopes and technological features of their manufacture.

The purpose of the work is to review the operation of fiber-optic gyroscopes and develop design documentation for the production of a sample.

The development method is the analysis of sources and conducting a practical experiment.

The research describes the main properties and algorithms of the optical gyroscope and the processing of optical signals.

In the course of the conducted research, the data obtained during the winding of fiber circuits were processed, the main winding defects were identified, and the influence of the laying step on the quality parameters was also determined. It was established how winding defects affect the operation of the device.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Огляд сучасного стану волоконно-оптичних датчиків кутової швидкості та тенденції їх розвитку.....	10
1.1 Основні особливості волоконно-оптичних датчиків кутової швидкості ..	10
1.2 Огляд стану виробництва мікроелектромеханічних датчиків кутової швидкості ближнього зарубіжжя	13
1.3 Тенденції розвитку волоконно-оптичних гіроскопів	18
2 Опис основних конструкторських рішень гіроскопа та технологічних особливостей виготовлення та збірки ВОГ	21
2.1 Склад та конструкція гіроскопа.....	21
2.2 Особливості з'єднання основних елементів гіроскопа.....	22
2.3 Котушка та технологія намотування оптичного волокна	25
2.4 Особливості збірки основних елементів конструкції ВОГ	31
2.4.1 Встановлення електронної плати живлення та управління діодом (модуль 2).....	31
3 Опис основних алгоритмів обробки сигналів модулем 3 та протоколу обміну даних	36
3.1 Мікроконтролер STM32G071CBT6.....	36
3.2 Основні характеристики операційної системи для забезпечення роботи мікроконтролера STM32G071CBT6	37
3.3 Алгоритм запуску операційної системи.....	43
3.4 Алгоритм роботи термостабілізації лазерного діода.....	44
3.5 Алгоритм реалізації підтримки заданої температури кристала лазерного діода	48
3.6 Алгоритм обробки сигналів фотодіода та передачі на персональний комп'ютер.....	50
4 Якість намотки чутливого елементу волоконно-оптичного гіроскопу	54
4.1 Волоконно-оптичний контур	544

	7
4.2 Дефекти намотки оптичного волокна на катушку	55
4.2.1 Намотування волокна за відсутності дефектів.....	59
4.2.2 Намотування волокна за наявності дефектів	60
4.2.3 Трансляція похибок на наступні ряди волокон.....	63
4.3 Крок укладання оптичного волокна на катушку	69
Висновки.....	67
Перелік джерел посилення	69
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	74

ВСТУП

Волоконно-оптичні гіроскопи (ВОГ) відіграють велику роль сучасних гіротехнологіях, що прийшли на зміну традиційним електромеханічним гіроскопам. Сьогодні в аерокосмічних додатках найчастіше використовуються лазерні гіроскопи. Але вони є недостатньо надійними внаслідок використання газових лазерів та сигналів високої напруги для керування приводами [1]. Альтернативні навігаційні та інерційні технології включають GPS, MEMS-гіроскопи, але більшість з цих технологій зазвичай використовуються в додатках, які не вимагають високої точності, оскільки є суттєві обмеження щодо точності, швидкості та надійності. Крім того, в умовах атмосферних перешкод доступ до GPS може бути заборонено.

Перевагами ВОГ є відсутність рухливих частин, миттєва готовність без традиційного часу «розігріву», змінна чутливість, яка залежить від довжини намотування волоконного датчика. Однак масо-габаритні характеристики та вартість ВОГ часто є обмежуючим фактором для їх застосування у додатках з високими вимогами, насамперед за рахунок необхідності використання приймально-передаючих пристроїв і волокон, що зберігають поляризацію випромінювання що проходить.

Розвиток інтерференційних волоконно-оптичних гіроскопів, що спостерігається протягом останніх років, обумовлено як поліпшення архітектури та методів оптимальної обробки сигналів, і прогресом хвилеводних технологій. Ці досягнення призвели до важливим розробкам у галузі волоконно-оптичного зв'язку, а саме до одномодових та волокнам, напівпровідниковим діодам, що зберігають поляризацію проходить випромінювання, інтегрованої оптики, лінійних волоконних компонентів та волокон з ефектом посилення на матеріалах, легованих рідкісноземельними елементами [2]. Залежно від точності та призначення ВОГ можуть бути класифіковані (табл. 1) [1].

Таблиця 1.1 – Класифікація волоконно-оптичних гіроскопів за точністю призначенням.

Точність	Призначення
100 град/год	Робототехніка, автомобільна промисловість
10 град/год	Стабілізація вертольотів
1 град/год	Визначення просторової орієнтації рухомих об'єктів
0,01 град/год	Гірокомпаси, телекомунікаційні супутники
0,01 град/год	Наукові супутники, авіоніка, системи управління ракетами, кораблями та підводними човнами
0,001 град/год	Аерокосмічні об'єкти високоточного застосування

1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ТА ТЕНДЕНЦІЇ ЇХ РОЗВИТКУ

1.1 Основні особливості волоконно-оптичних датчиків кутової швидкості

Принцип дії ВОГ заснований на ефекті Саньяка, відповідно до якого в кільцевому інтерферометрі виробляється різниця фаз $\Delta\varphi_R$, пропорційна скалярному виробленню вектора швидкості обертання та вектора площі, утвореної замкнутим світлопроводом. Математично ефект Саньяка описується формулою:

$$\Delta\varphi_R = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega , \quad (1.1)$$

де L – загальна довжина котушки;

D – середній діаметр котушки;

Ω – складова кутової швидкості, паралельна осі котушки;

c – швидкість світла у вакуумі.

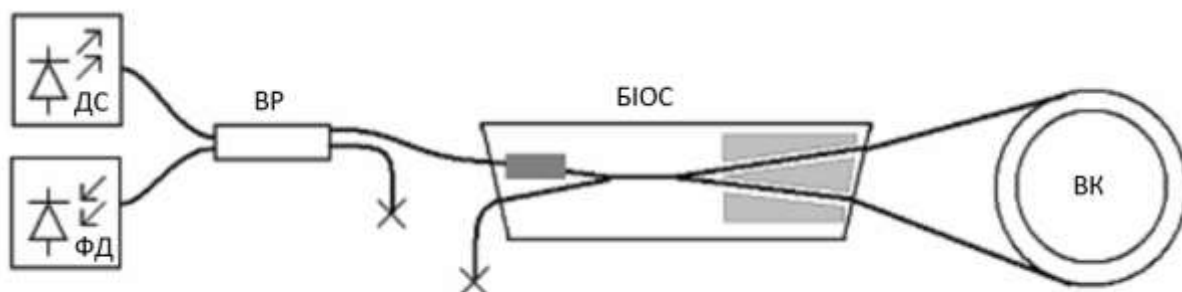
Таке математичне подання ефекту Саньяка пов'язане з тим, що d порівнянні з частотою, поняття довжини оптичної хвилі у вакуумі λ є найпоширенішим.

Збільшити або зменшити чутливість ВОГ можна шляхом зміни площі чутливої котушки. Ця геометрична гнучкість є важливою технологічною перевагою, оскільки одні й ті ж компоненти та складальні технології можуть бути використані для створення різних модифікацій одного і того ж вимірювача без суттєвої модернізації. Приклади таких варіацій наведено у табл. 1.2 [2].

Таблиця 1.2 – Приклади впливу конструктивних параметрів на чутливість ВОГ

Чутливість	L, км	D, см	λ , нм	$\Delta\varphi_R/\Omega$	Ω_s , град/с	Ω_h , град/год
Висока	1	10	1550	1,35	133	0,15
Середня	0,2	3	850	0,15	1220	1,4

Характеристики точності ВОГ багато в чому залежать від характеристик його основних елементів та особливостей методик його складання. Одну з можливих структурних схем ВОГ показано на рис. 1.1 [3].



ДС – джерело оптичного випромінювання; ФД – фотоприймач;

ВР – волоконний розгалужувач; ВК – волоконний контур;

БІОС – багатофункціональна інтегрально-оптична схема.

Рисунок 1.1 – Структурна схема ВОГ

Основні фактори, що впливають на точність ВОГ, суть їх дії та шляхи усунення наведені у табл. 1.3 [4].

Таблиця 1.3 – Основні фактори, що впливають на точність ВОГ, та механізм їх дії

Фактор	Механізм дії
Оптичні втрати	Чутливість ВОГ обмежена дробовим шумом, який обчислюється як величина, обернена до квадратного кореня потужності
Теплові перешкоди	Залежний від часу температурний градієнт вздовж довжини волокна може призвести до помилкових фазових зсувів внаслідок температурної залежності показника заломлення волокна Для мінімізації цього ефекту необхідно використовувати волокна з меншим значенням dn/dT . Квадрупольна намотування, в якій рівновіддалені від центру точки волокна розташовані у фізично рівних умовах, також значно зменшує цей ефект
Зворотне розсіювання світла	Зворотне розсіювання на вхідних/вихідних з'єднувачах та інших неоднорідностях інтерференційних ВОГ може бути причиною виникнення паразитних інтерференцій. Імерсійні елементи для зменшення різниць показників заломлення, а також використання похилих поверхонь у МІОС знижують зворотне розсіювання
Оптичний ефект Керра	Електричні поля розповсюджуються в протилежних напрямки променів можуть призвести до таких змін показника заломлення, які будуть невзаємними, якщо світло розщеплюється на нерівні частини. Невзаємність, спричинена нелінійним ефектом Керра, може бути суттєво знижена шляхом використання низькокогерентного джерела випромінювання
Магнітооптичний ефект	Магнітооптичний ефект Фарадея призводить до паразитного дрейфу гіроскопа. Значне зменшення його впливу досягається шляхом використання волокон, що зберігають поляризацію випромінювання, а також за рахунок використання оболонок з пермалою

1.2 Огляд стану виробництва мікроелектромеханічних датчиків кутової швидкості ближнього зарубіжжя

В даний час ВОГ розроблення ближнього зарубіжжя широко використовуються в системах управління, у тому числі стабілізації та навігаційних системах. Існуючі ВОГ забезпечують широкий точнісний діапазон: від 10 град/год. до 0,001 град/год. Що стосується технології виготовлення, то для здешевлення виробництва застосовуються відкрита схема обробки та цільно-волоконна технологія виготовлення.

Параметри ВОГ, що випускаються компанією "Фізоптика", наведені в табл. 1.4 [5].

Для забезпечення широкого динамічного діапазону вимірювання швидкостей застосовується замкнута схема обробки інформації. Довжина волокна у волоконному контурі становить 1000 і 2000 м для гіроскопів ОІУС-1000, ОІУС-2000 відповідно. В якості модулятор у таких гіроскопи застосовується інтегрально-оптична схема на ніобаті літію на основі протонно обмінних хвилеводів. Для зменшення чутливості вихідного сигналу гіроскопу по зовнішньому магнітному полю застосовуються магнітні екрани з пермалою.

Далі буде наведено фізико-технічні параметри параметри волоконно-оптичних датчиків, що випускаються ТОВ «Фізоптика» (табл. 1. 4.).

Таблиця 1.4 – Основні параметри волоконно-оптичних датчиків, що випускаються ТОВ «Фізоптика»

Тип датчика	ВГ-910	ВГ-910С	ВГ-910Ф	ВГ-910Q	ВГ-941-3AS	ВГ941-3AM	ВГ-071П	ВГ941-3Б
Параметр	min/ max	min/ max	min/ max	min/ max	min/ max	min /max	min/ max	min /max
Масштабний коефіцієнт (МК), (+20 °C), мВ/град/с	45/65	8/12	5,5/8.5	5,5/8.5	2.7/3,9	3.0/4.4	3.0/4.4	2.4/3.6
Нестабільність МК при постійній температурі, 1 СКО, %	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2
Невідтворюваність МК при постійній температурі, 1СКО, %	-0,6	-0,6	-0,3	-0,3	-0,6	-0,2	-0,6	-0,6
Температурний коефіцієнт МК, %/°C	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1
Зсув нуля (+20 °C), мВ	-20	-10	-0,4	-0,4	-0,5	-0,4	-0,5	-10
Нестабільність зсуву нуля при постійній температурі, 1 СКО, град/год	-30	-30	-10	-7	-100	-40	-100	-100
Не відтворюваність зсуву нуля при постійній температурі, 1 СКО, град/год	-60	-60	-20	-15	-180	-80	-180	-180
Температурний коефіцієнт зсуву нуля, мкВ/°C	-100	-50	-3	-3	-5	-3	-5	-50
Максимально вимірювана кутова швидкість, град/с	200/-	200/-	300/-	300/-	500/-	500/-	400/-	500/-

Продовження табл. 1.4

Спектральна щільність шумової складової вихідного сигналу, мкВ√ Гц	-/50	-/10	-/15	-/15	-/10	-/15	-/10	-/10
Час готовності, с	-/0,2	-/0,2	-/0,2	-/0,2	-/0,2	-/0,2	-/0,2	-/0,2
Струм споживання +5В (+20 °С, мА)	-/140	-/150	-/180	-/180	-/140	-/180	-/140	-/150
Смуга частот за рівнем 0,7, не менше, Гц	800/-	800/-	400/-	400/-	800/-	400/-	800/-	800/-
Габарити (без роз'єму), мм	82×82×20				Ø24×51	27 × 35 × 60		Ø27×58
Маса (приблизно),г	130			80	30	80	50	50
Напруги живлення,В	+ 5 ±16	+ 4,9 В ... + 5,1 В						
Удар (міцність)	90 g, 1 мс			90 g, 1 мс				
Вібрація (шум) частота, амплітуда (СКО)	20 Гц... 2 кГц			20-500 Гц	20 Гц... 2 кГц		20-500Гц	0.02-2кГц
	6 g			6 g				
Діапазон робітників температур, °С	-30...+ 70			-30...+ 70			-55...+ 60	-30...+ 70
Гранична температура (<2год), °С	-55...+ 8						-60...+ 85	-55...+ 85
Тип датчика			ВГ-949П	ВГ-991	ВГ-951	ВГ-035П	ВГ-035К	ВГ-035С-01
Параметр			min/max	min/max	min/max	min/max	min/max	min/max
Масштабний коефіцієнт (МК), (+20 °С), мВ/град/с			5,0/7.4	13/19	20/28	17/24	17/24	17/24
17/24Нестабільність МК при постійній температурі, 1 СКО, %			-/0,2	-/0.1	-/0.1	-/0.1	-/0.1	-/0.1
Невідтворюваність МК при постійній температурі, 1 СКО, %			-/0,6	-/0,2	-/0,2	-/0,2	-/0,2	-/0,2
Температурний коефіцієнт МК, %/°С			0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1	0/0,1
Зсув нуля (+20 ° С), мВ			-/0,5	-/0.4	-/0.4	-/0.4	-/0.4	-/0.4
Нестабільність зсуву нуля при постійній температурі, 1 СКО, град/год			-/60	-/4	-/2	-/2	-/0,7	-/0,7

Кінець табл. 1.4

Невідтворюваність. зсуву нуля при постійній температурі, 1 СКО, град/год	-/120	-/8	-/4	-/4	-/4	-/4
Температурний коефіцієнт зсуву нуля, мкВ/°С	-/5	-/3	-/3	-/3	-/3	-/3
Максимальна кутова, що вимірюється швидкість, град/с	300/-	150/-	80/-	100/-	100/-	100/-
Спектральна щільність шумової складової вихідного сигналу, мкВ√ Гц	-/10	-/15	-/15	-/15	-/15	-/7
Час готовності, с	-/0,02	-/0,02	-/0,02	-/0,02	-/0,02	-/0,02
Струм споживання +5 В (+20 °С, мА)	-/140	-/180	-/180	-/180	-/180	-/180
Смуга частот за рівнем 0,7, не менше, Гц	800/-	400/-	400/-	400/-	400/-	400/-
Габарити (без роз'єму), мм	63×63 ×22	Ø117× 21	Ø150 ×32	Ø133×30		
Маса (приблизно), г	50	300	330	250		
Напруги живлення, В	+4,9 В ...+ 5,1 В					
Удар (міцність)	40 g, 1 мс					
Вібрація (шум) частота, амплітуда (СКО)	20 Гц ...500 Гц					
	2 g					
Діапазон робочих температур, °С	-30...+70					
Гранична температура (<2год), °С	-55...+85					

В даний час в інерційній навігації широко застосовуються ВОГ із замкнутим контуром зворотного зв'язку, наприклад, одновісний ВОГ ОІУС-1000 виробництва компанії «Оптолінк», з довжиною волоконного контуру 500 м [4]. Ці ВОГ виготовляються в мінімальній конфігурації з однаковими оптичними шляхами для двох променів, що поширюються у волоконному контурі. Типова структурна схема ВОГ серії ОІУС показано на рис. 1.2.

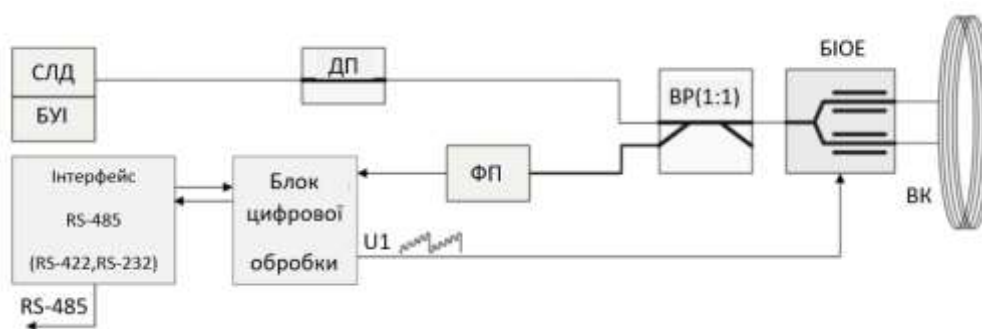


Рисунок 1.2 – Структурна схема ВОГ ОІУС-1000

Схема включає такі елементи: СДЛ – суперлюмінесцентний діод; БУІ – блок управління випромінювачем; ВР – волоконний розгалужувач; ВК – волоконний контур; БІОЕ – багатофункціональний інтегральний оптичний елемент; ФП – фотоприймальний пристрій; ДП – деполаризатор; RS-485 – послідовний інтерфейс

Характеристики основних ВОГ виробництва компанії «Оптолінк» [6] наведено в табл. 1.5 [6].

Таблиця 1.5 – Характеристики основних ВОГ виробництва компанії «Оптолінк»

Характеристики	ОІУС-2000	ОІУС-1000	ОІУС-501	ОІУС-200	ОІУС-500	ТІУС-200
Кількість осей	одна	одна	одна	три	три	три
Діапазон вимірів, град/с	± 40	± 100	± 250	± 750	± 300	± 750
Зміщення нуля, град/с	$<0,005$	$<0,01$	$<0,1$	$<0,2$	$<0,5$	$<10,0$
Зміщення нуля в діапазоні $-30 \dots 50^\circ\text{C}$, град/год	$<0,01$	0,05	0,3	0,5	1,0	30,0
Похибка масштабного коефіцієнта, %	0,008	0,01	0,05	0,01	0,1	0,5

Продовження табл. 1.5

Спектральна щільність шуму, град/√год	0,001	0,002	0,008	0,02	0,01	0,02
Смуга пропускання, Гц	50	100	250	400	300	500
Маса приладу, кг	1,7	0,8	0,4	0,22	1,1	0,4
Габаритні розміри, мм	Ø250×40	Ø150×40	Ø100×30	Ø70×28	110×110×90	Ø61×90
Вихідний сигнал	RS232/RS485/RS422					
Споживана потужність, Вт	7,0					
Напруга, В	5,0					

В основному прилади компанії «Оптолінк» призначені для експлуатації при наступних умовах: температурі навколишнього середовища в діапазоні від – 40 до +60 °С і швидкості зміни температури не більше 0,4 °С/хв; тиску до 10^{-4} мм рт. ст.; відносної вологості від 20 % до 70 %; напрузі живлення в інтервалі $5 \pm 0,25$ В [7–9].

Наведені вимоги свідчать про можливість експлуатації приладів у досить складних умовах, у тому числі при експлуатації на космічних рухомих об'єктах.

1.3 Тенденції розвитку волоконно-оптичних гіроскопів

Для зменшення розмірів та вартості інерційних вимірювальних блоків на основі ВОГ доцільно використовувати багатовісні ВОГ з одним загальним джерелом [10–13]. Зокрема, може використовуватись тріада кільцевих інтерферометрів для вимірювання трьох взаємно перпендикулярних складових кутової швидкості. Зазвичай у цьому випадку використовується активоване ербієм волокноне джерело, оскільки його велика потужність може бути

розподілена з найменшими шумами. Крім того, неполяризованість джерела дозволяє використовувати пучок простих пристроїв зв'язку.

Наступною тенденцією розвитку ВОГ є мультиплексування [2]. Джерело розподіляється між декількома інтерферометрами, що складаються з чутливої котушки та багатофункціональної інтегрально-оптичної мікросхеми. При цьому сигнали повертаються на окремий детектор. Мультиплексування виконується за допомогою фазової модуляції. Одним із можливих підходів до вирішення проблеми є послідовне застосування модуляції до одного інтерферометру, у той час як до інших інтерферометрів модуляція не застосовується. При другому підході решта інтерферометрів також модулюється з інтервалом $\pm \pi$ радий, що значно знижує їх чутливість.

Оскільки факторами, що обмежують масо-габаритні характеристики та вартість, ВОГ насамперед є приймально-передавальні пристрої та дороге волокно; подальший розвиток ВОГ пов'язаний із створенням волокон з низькою вартістю, низькокогерентних джерел світла високої потужності та технологій високонадійної компонуванняльної гібридних фотонних пристроїв [1].

Компонування окремих фотонних пристроїв залежить від технології прецизійної укладки волокна. Тому поява нових технологій укладання оптичного волокна зумовило можливість інтеграції кількох фотонних пристроїв у єдиний блок. Останні досягнення в галузі інтеграції призвели до можливості створення приймально-передавальних пристроїв з масо-габаритними характеристиками $15 \text{ мм} \times 13 \text{ мм} \times 8 \text{ мм}$. Для створення такого компактного пристрою без втрат у характеристиках була розроблена нова технологія укладання оптичного волокна з мікронною точністю.

Волоконно-оптичні гіроскопи, призначені для умов експлуатації підвищеної складності, тобто в умовах вібрації, ударів, а також широкого діапазону температур (наприклад, від -54°C до $+85^\circ\text{C}$), як правило, вимагають підвищеної надійності та тривалого терміну експлуатації. Створення відповідних датчиків потребує використання інтерференційних волоконно-оптичних гіроскопів з високим ступенем гібридної інтеграції.

Гібридна оптична інтеграція не тільки покращує характеристики точності та живучості у складних умовах експлуатації, але й значно скорочує вартість датчиків.

Висновки. Проаналізовано стан розробки сучасних волоконно-оптичних гіроскопів. Наведено характеристики датчиків виробництва ближнього та далекого зарубіжжя. Визначено сфери застосування сучасних волоконно-оптичних гіроскопів. Наведено основні тенденції розвитку датчиків досліджуваного типу.

2 ОПИС ОСНОВНИХ КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ ГІРОСКОПА ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ЗБІРКИ ВОГ

2.1 Склад та конструкція гіроскопа

Конструкція гіроскопа складається з трьох основних модулів: модуль 1 – оптична частина; модуль 2 – система управління джерелом випромінювання; модуль 3 – система обробки оптичного сигналу та виведення даних на дисплей (рис. 2.1).

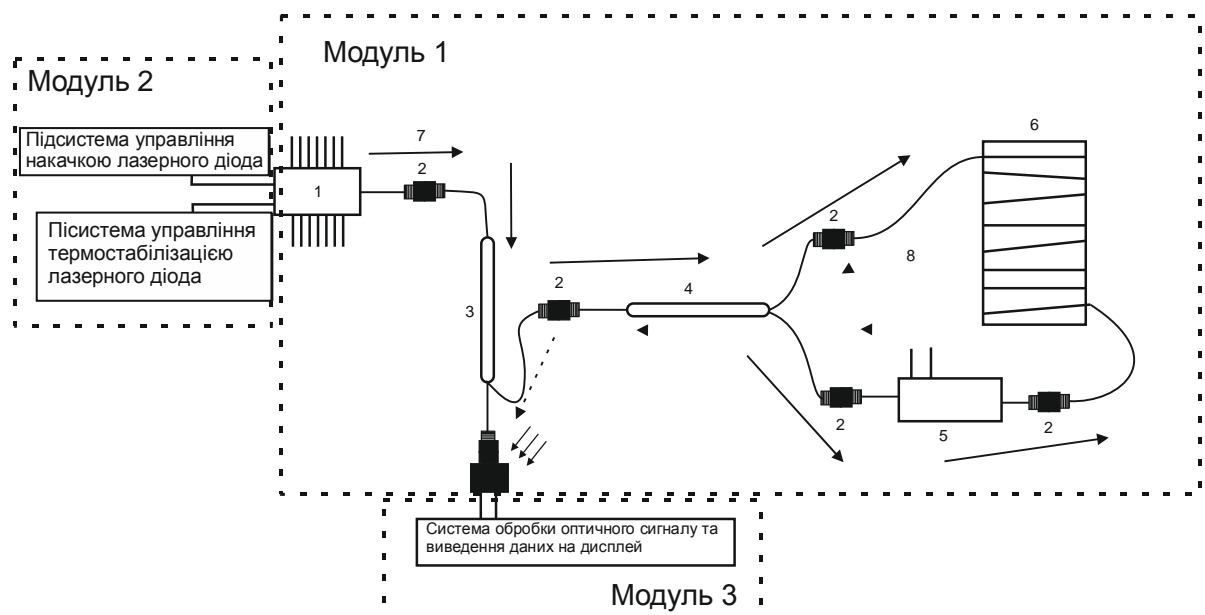


Рисунок 2.1 – Схема оптоволоконного гіроскопа

До складу модуля 1 входить: 1 – лазерний діод з волоконним виводом; 2 – муфта для з'єднання волоконно-інтегральних елементів; 3 – інтегральний оптоволоконний циркулятор; 4 – інтегральний оптоволоконний розгалужувач світла; 5 – інтегральний модулятор фази; 6 – інтегрально-волоконний модулятор фази; 7 – напрямок випромінювання з лазерного діода; 8 – напрямок випромінювання після проходження котушки з волокном; 9 – фотодіод.

До складу модуля 2 входить: підсистема управління накачкою лазерного діода та підсистема управління термостабілізацією лазерного діода, підсистеми виконані на одній друкарській платі з використанням сучасних електронних компонент типу SMD.

Модуль 3 виготовлений у вигляді електронної друкарської плати на основі сучасних електронних компонент типу SMD.

На рис. 2.2 зображено ескіз розробленого гіроскопа.

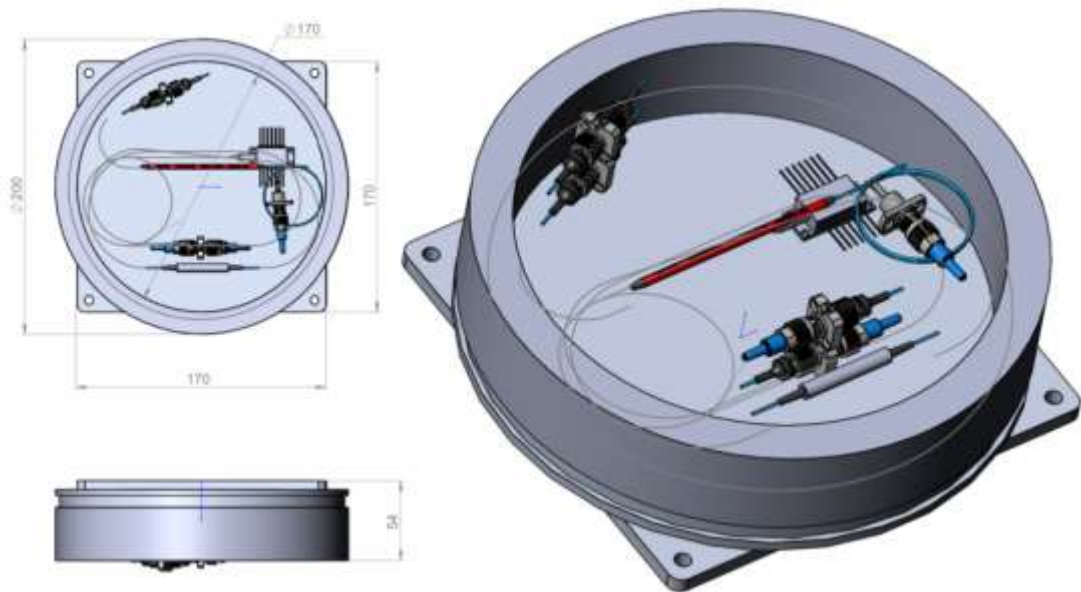


Рисунок 2.2 – Ескіз пристрою ВОГ

2.2 Особливості з'єднання основних елементів гіроскопа

1. Суперлюмінесцентні лазерні діоди (СЛД) схожі з напівпровідниковими лазерами тим, що значна частка випромінювання забезпечується механізмом вимушеного випромінювання, проте на відміну від лазерів в СЛД відсутні дзеркала резонатора (часто на вихідну поверхню СЛД для придушення відбиття наноситься покриття, для просвітлення), тому випромінювання робить (в ідеалі) тільки один прохід по активному середвищі, і посилюються не окремі моди, а всі довжини хвиль в діапазоні посилення. Смуга випромінювання суперлюмінесцентних діодів (на 2005 рік) від 20 нм до

100 нм, що більше, ніж у напівпровідникових лазерів, але менше, ніж у світлодіодів. За потужністю випромінювання СЛД наближаються до діодного лазера (на 2005 рік – десятки міліват). Випускаються найчастіше в корпусах, характерних для лазерних діодів, з виходом випромінювання через вікно або оптоволокно. Широка смуга випромінювання СЛД означає низьку довжину когерентності (від декількох мікрометрів), що забезпечує мікрометровий дозвіл в оптичній когерентній томографії та високу чутливість в волоконно-оптичних гіроскопах.

При збірці оптичної схеми ВОГ лазерний суперлюмінісцентний діод DL-CS5403A поєднується з портом 2 циркулятора 6015-3-FC через муфту ADAFCPM2.

2. Оптичний циркулятор – це спеціальний волоконно-оптичний компонент, який можна використовувати для розділення оптичних потужностей при переміщенні в протилежних напрямках в оптичному волокні, аналогічно роботі електронного циркулятора. Оптичний циркулятор – трьохпортовий пристрій, сконструйований таким чином, що світло, що входить в будь-який порт, виходить з наступного порту. Це означає, що якщо світло входить в порт 1, то він буде випромінюватися з порту 2, а світло, що входить в порт 2 буде виходити з порту 3. Циркулятори можна використовувати для двосторонньої передачі по одному оптоволокну. Завдяки надійній ізоляції входу і відбитої оптичної потужності і малим внесеним втрат оптичні циркулятори широко використовуються в оптоволоконних датчиках [5–7].

Тобто, в ВОГ циркулятор виконує дві функції: направляє випромінювання на фотодіод та захищає кристал суперлюмінесцентного діода від зворотного випромінювання.

Порт 2 циркулятора 6015-3-FC поєднується з портом (BLUE PORT) волоконно-оптичного розгалужувач-комбінера PFC1550HF через муфту ADAFCPM2.

Порт 3 циркулятора 6015-3-FC приєднується до вивідного корпусу фотодіода FGA01FC.

3. Волоконно оптичний розгалужувач-комбінер PFC1550HF з двома вхідними портами PM та одним вихідним портом SM призначений для поєднання двох ортогональних поляризацій у єдине волокно. Ці пристрої повністю працюють через волокно; поляризаційні стани розділяються або поєднуються через сплавлений волоконний перехід. Суцільноволокниста конструкція забезпечує більш високу передачу та більшу потужність у порівнянні з комбінером поляризаційного пучка на основі кальцитової призми (рис. 2.3).

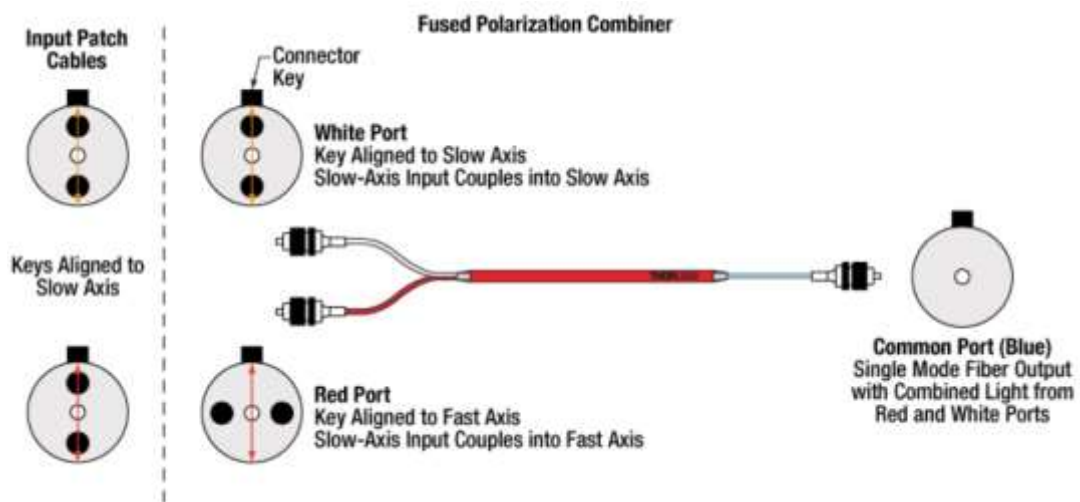


Рисунок 2.3 – Схема підключення та роботи волоконно-оптичного розгалужувача-комбінера PFC1550HF

Випромінювання з оптичного циркулятора через порт (BLUE PORT) волоконно-оптичного розгалужувача-комбінера PFC1550HF ділиться по потужності 50/50 і виходить через інші порти WHITE PORT та RED PORT лінійно поляризованим, але в різних осях волокна типу «Panda»: в швидкій осі та повільній.

WHITE PORT та RED PORT волоконно-оптичного розгалужувача-комбінера PFC1550HF поєднується з портами оптичного волокна PM 15-U25D через муфти ADAFCPM2.

4. Волокна зі збереженням поляризації випромінювання розроблені для забезпечення поляризаційних властивостей лінійно-поляризованих джерел випромінювання. Завдяки еліптичній напружуючій боросилікатній оболонці, яка створює ефект двопронезаломлення в серцевині оптичного волокна, асиметричні напруги, що виникають навколо серцевини волокна, по-різному діють на показник заломлення в двох ортогональних осях. Тому в таких світловодах має місце різниця геометричного шляху поширення двох ортогонально-поляризованих мод. Шлях поляризованої моди уздовж малої осі еліпса (відповідно час поширення цієї моди) менше, ніж уздовж великої осі. Тому мала вісь часто називається швидкою, а велика вісь - повільною. Тобто, для забезпечення інтерференції в оптичному волокні котушки повинна зберігатися постійна орієнтація поляризації двох зустрічних хвиль, що не забезпечується звичайним оптичним волокном типу SMF-28 [14–17].

Порти оптичного волокна PM 15-U25D через муфти ADAFCPM2 приєднуються до портів WHITE PORT та RED PORT волоконно-оптичного розгалужувача-комбінера PFC1550HF.

Важливо!!! Конектори кінців оптичного волокна PM 15-U25D повинні співпадати ключами з повільною віссю волокна (рис. 2.3).

5. Гель для з'єднання оптичних конекторів G608N3 зменшує втрати потужності на з'єднанні оптичних конекторів через муфту. Гель вводиться в середину муфти ADAFCPM2 перед з'єднанням оптичних елементів.

2.3 Котушка та технологія намотування оптичного волокна

Котушка була виготовлена з склотекстоліту без нанесення фольги марки СТЕФ-1 товщиною 40 мм. Склотекстоліт має подібні характеристики з кварцовим покриттям оптичного волокна, що забезпечить мінімізацію розширення та порушення цілісності волокна при зовнішніх температурних впливах.

При намотуванні оптичного волокна для зменшення втрат потужності та впливу зовнішніх факторів, що впливає на точність вимірювання пристрою взагалі, використовується квадрупольний тип намотування (рис. 2.4). Крім цього такий тип намотування дає можливість вивести кінці оптичного волокна в одній точці протилежно один одному.

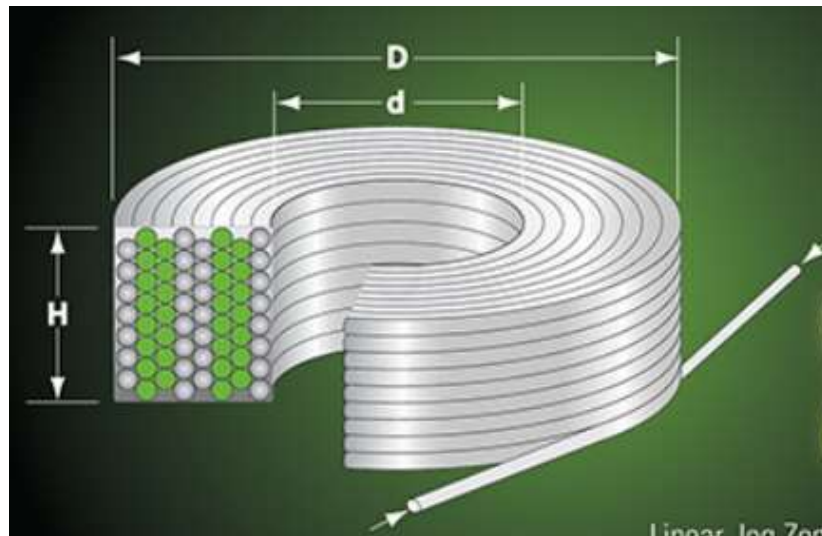


Рисунок 2.4 – Квадрупольний тип намотування оптичного волокна

Для цього було розроблено технологічне оснащення для перемотки оптичного волокна з котушки виробника та відмітки центру його довжини (рис. 2.5).

Вручну з котушки постачальника оптичне волокно було повністю перемотано на котушку №1 та підраховано кількість імпульсів датчиком. Після цього з котушки №1 половина довжини оптичного волокна (половина кількості імпульсів датчика, які було перед цим пораховано для всієї довжини) було перемотано на котушку №2. По центру оптичного волокна було поставлено мітку (флажок або маркування маркером).

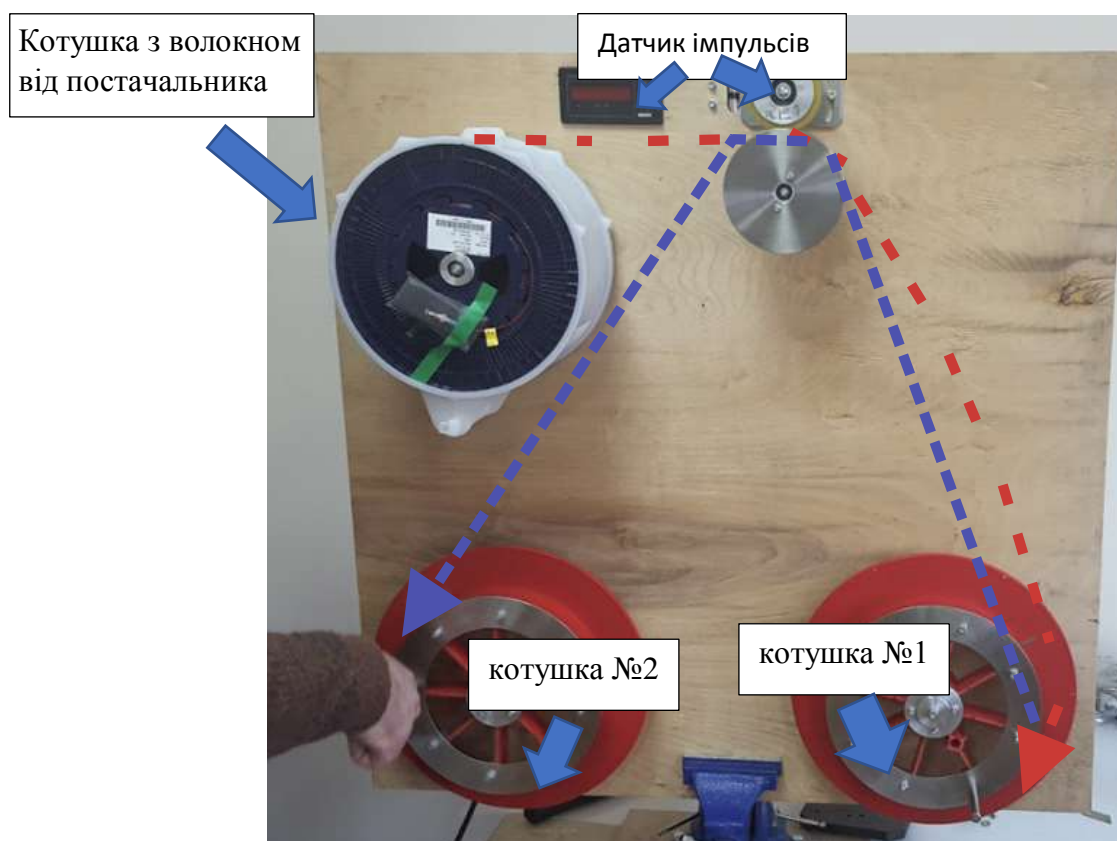


Рисунок 2.5 – Технологічне оснащення для перемотування оптичного волокна та знаходження його центру

Наступним кроком було виготовлено оснащення для намотування оптичного волокна на котушку ВОГ (рис. 2.6).

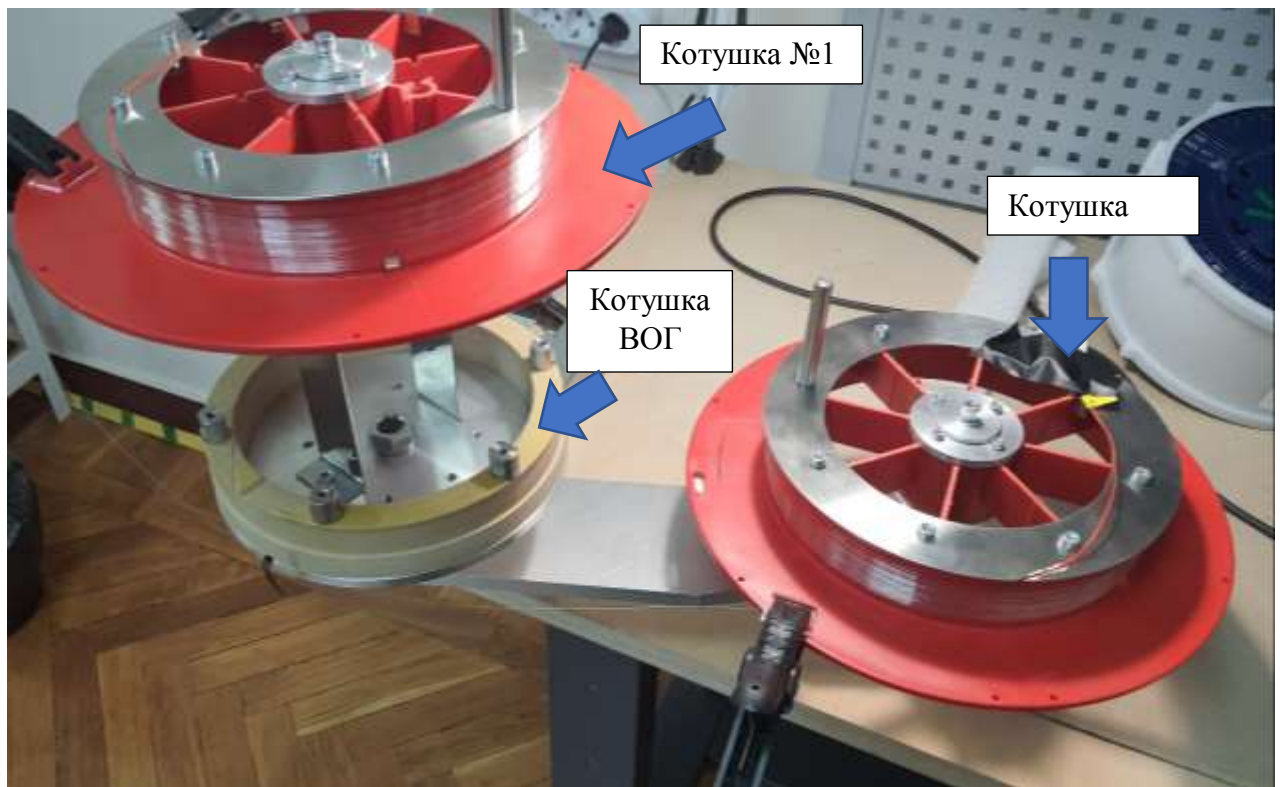


Рисунок 2.6 – Процес намотування оптичного волокна на котушку ВОГ

На рис. 2.6 котушка №1 знаходиться в фіксованому положенні, а котушка №2 крутиться на оснащенні навколо котушки ВОГ. Далі оптичне волокно центром своєї довжини міститься внизу вифрезируваного місця для його посадки чітко по центру заходу волокна в середину котушки (рис. 2.7). Після цього котушка №2 обертається навколо котушки ВОГ проти часової стрілки, а волокно вкладається знизу вверх шар за шаром (направляється вручну). Після цього кінець оптичного волокна з конектором фіксується на котушці №2, яка переставляється на місце котушки №1. Наступним кроком проводиться процедура намотування волокна з котушки №1 обертаючи її навколо котушки ВОГ за часовою стрілкою. Після намотування кінці оптичного волокна заводяться через пази в середину котушки.

Перед намотуванням волокна з котушки №2 на котушці ВОГ наноситься точково клей «Дракон», для фіксації першого шару(клей полімеризується протягом 15 хв). Після кожного третього шару на котушці ВОГ з волокном

наносити клей для фіксації. Після намотування всього волокна нанести клей по всій боковій поверхні котушки ВОГ де знаходиться оптичне волокно. Нанести клей в пази з оптичним волокном (рис. 2.8).

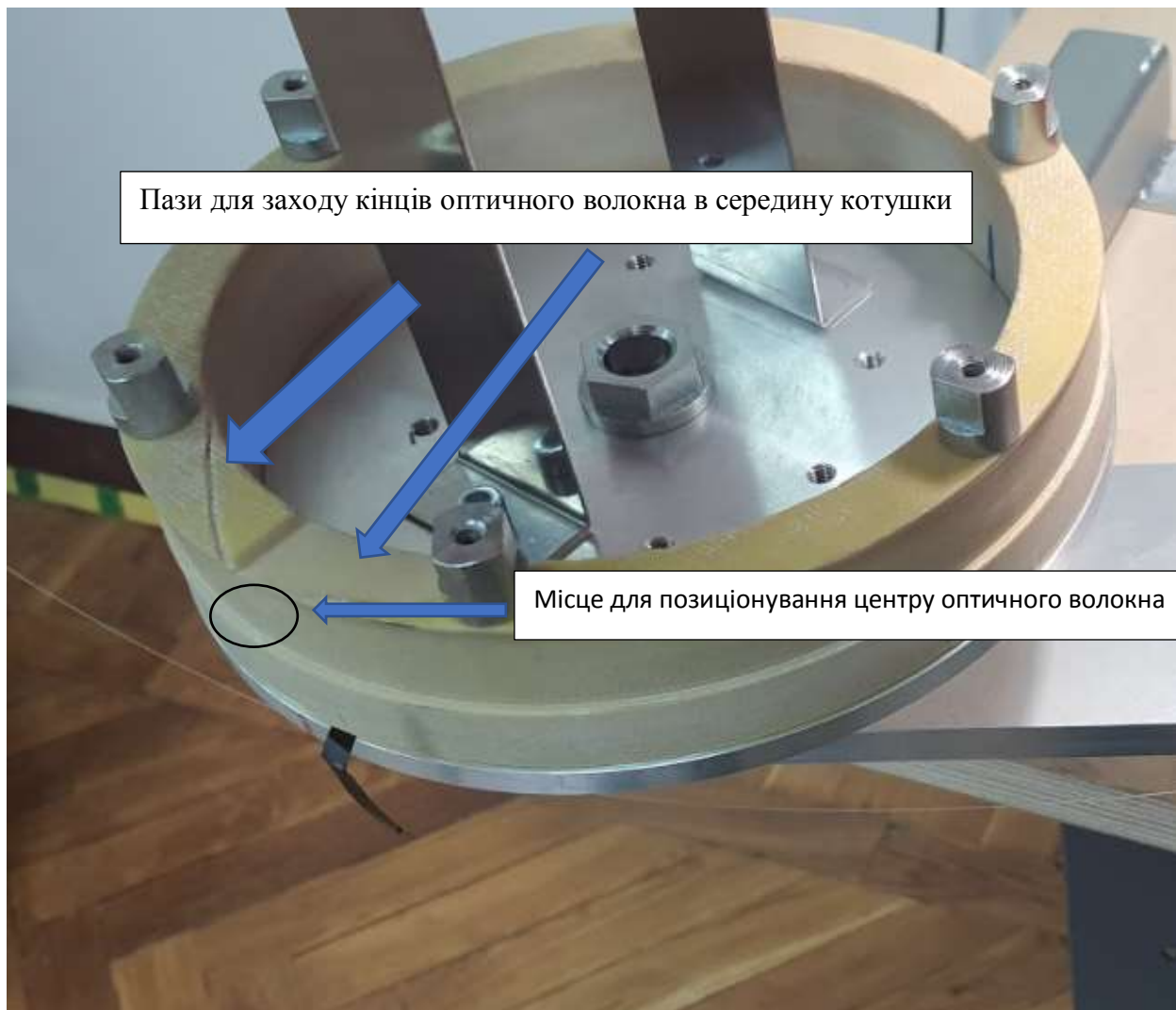


Рисунок 2.7 – Позиціонування оптичного волокна перед початком намотування на котушку ВОГ

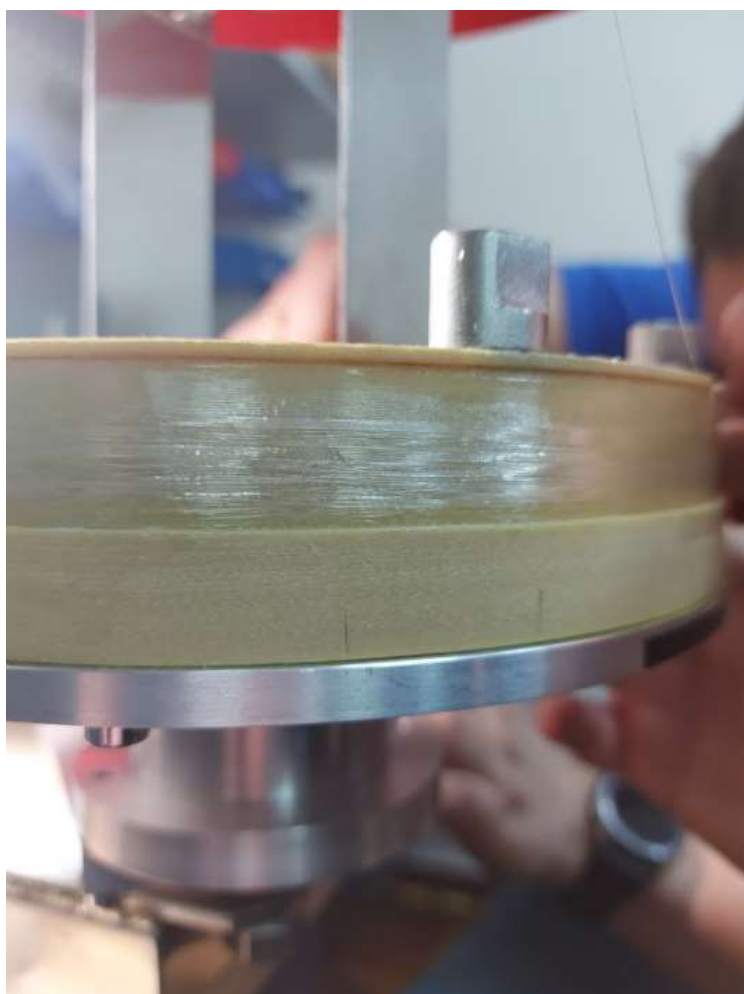


Рисунок 2.8 – Котушка ВОГ з намотаним оптичним волокном

Після намотування всієї довжини оптичного волокна на катушку ВОГ, катушка знімається з технологічного оснащення (рис. 2.9).

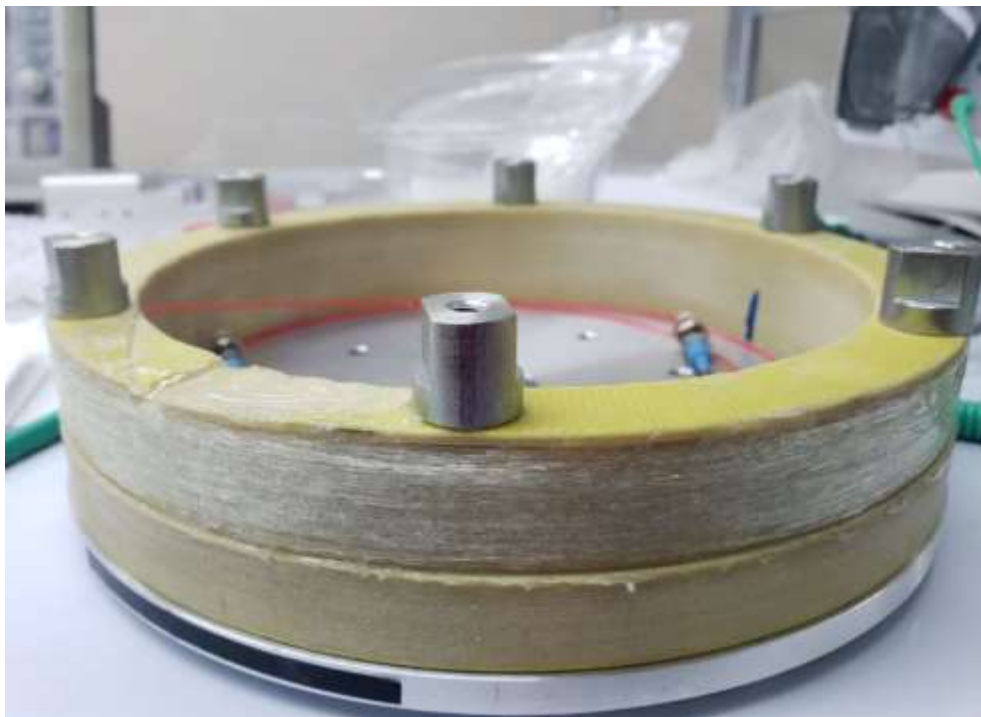


Рисунок 2.9 – Катушка ВОГ

2.4 Особливості збірки основних елементів конструкції ВОГ

2.4.1 Встановлення електронної плати живлення та управління діодом (модуль 2)

На основу корпусу ВОГ вкласти ізоляційний матеріал, наприклад VM120-0.45, або інший, для уникнення короткого замикання на платі живлення (рис. 2.10) [18].

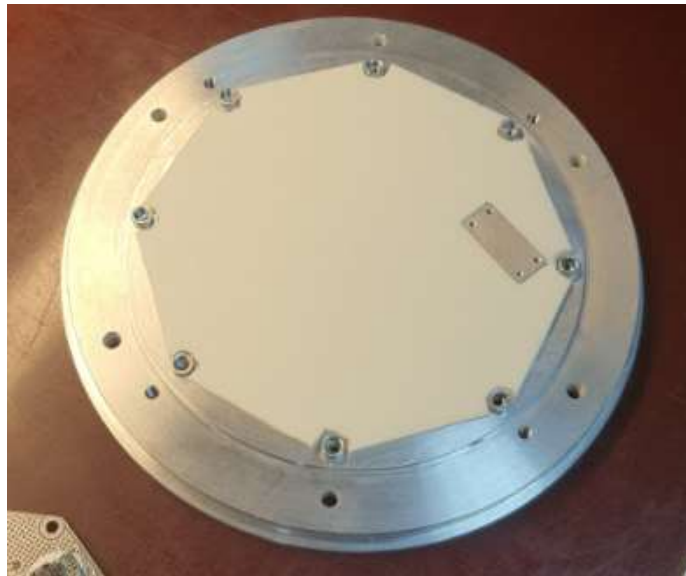


Рисунок 2.10 – Основа ВОГ з ізоляційним матеріалом

Встановити плату живлення та управління діодом з розпаяними на свої місця електронними компонентами (рис. 2.11).

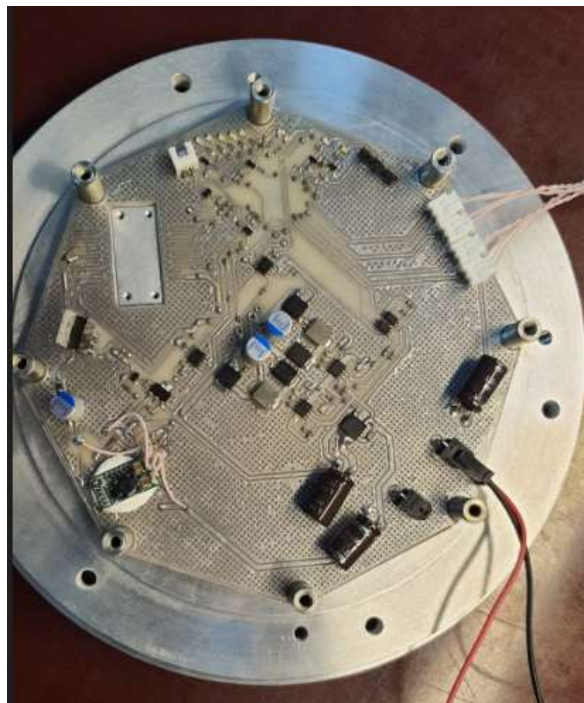


Рисунок 2.11 – Основа ВОГ з ізоляційним матеріалом
та платою управління (модуль2)

На зворотню сторону основи лазерного діода нанести термопасту КПТ-8, або іншу (рис. 2.12).

При роботі з діодом не знімати захист від короткого замикання з контактів. При припаюванні контактів діода монтажник повинен використовувати антистатичний браслет.

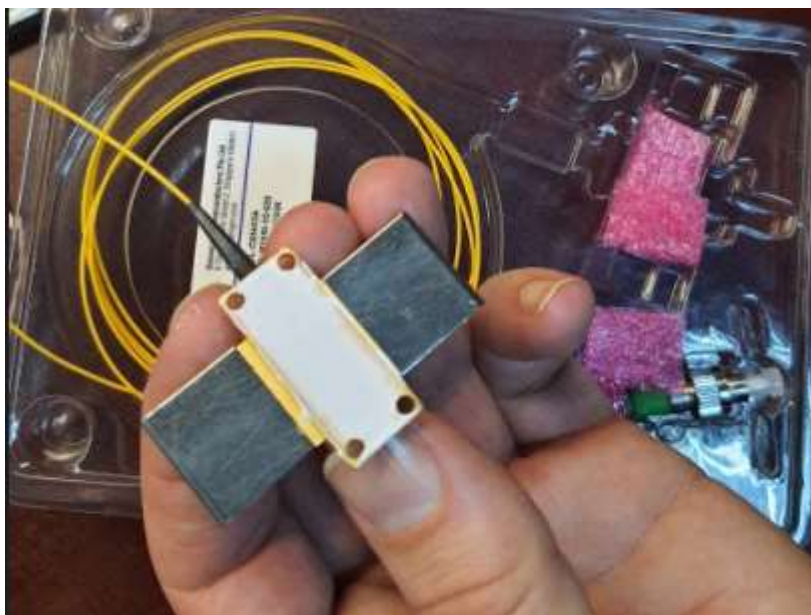


Рисунок 2.12 – Нанесення термопасту на основу лазерного діода

Встановити лазерний діод на посадочне місце на основі ВОГ та припаяти контакти до плати, перед цим закріпивши корпус діода до основи гвинтами (рис. 2.13).

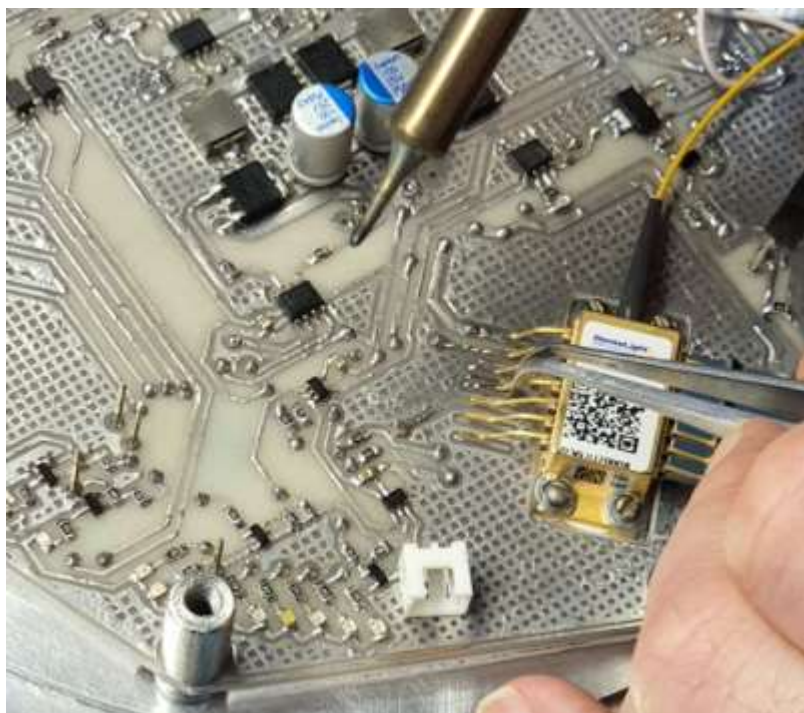


Рисунок 2.13 – Монтаж лазерного діода на основу BOT та плату

Наступним кроком надати напругу живлення на пристрій (12 В) та перевірити роботу лазерного діода за допомогою карти візуалізації (рис. 2.14) [19].

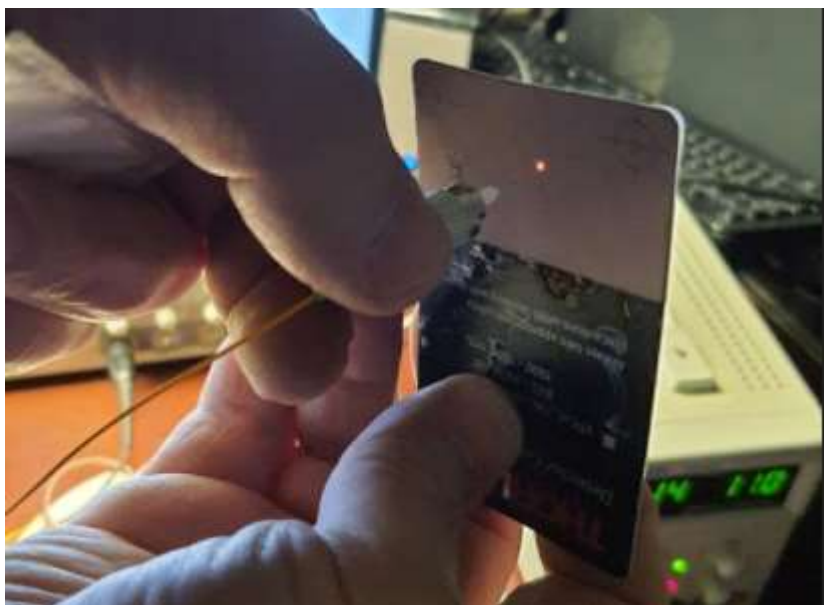


Рисунок 2.14 – Перевірка роботи лазерного діода

Зібрати та розмістити всі інші елементи конструкції згідно конструкторської документації. Додати гель G608N3 в муфти, окрім муфти, що з'єднує REDPORT волоконно-оптичного розгалужувач-комбінера PFC1550HF з оптичним волокном.

ВАЖЛИВО!!! Для забезпечення інтерференції на виході інтерферометру Саньяка потрібно щоб два зустрічних пучка випромінювання мали однакові параметри поляризації, інтерференція дуже чутливе фізичне явище, яке потрібно підстроювати, тому на одному з конекторів вихідних портів волоконно-оптичного розгалужувач-комбінера PFC1550HF, а саме REDPORT потрібно зпиляти ключ, для подальшого його обертання в муфті ADAFCPM2 (рис. 2.15). Обертаючи конектор REDPORT розгалужувача в муфті потрібно знайти мінімальний рівень сигналу на виході фотоприймача за допомогою осцилографа, після цього зафіксувати конектор або даних які отримуються з RS232.



Рисунок 2.15 – Зображення оптичного конектора зі зпиляним ключем

Електричні принципові схеми волоконного гіроскопа та модуля2, модуля 3 розміщені в конструкторській документації на виготовлення дослідного зразка пристрою.

3 ОПИС ОСНОВНИХ АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ МОДУЛЕМ 3 ТА ПРОТОКОЛУ ОБМІНУ ДАНИХ.

3.1 Мікроконтролер STM32G071CBT6

Для обробки інформації отриманої при роботі оптоволоконного гіроскопа вибрано мікроконтролер STM32G071CBT6 фірми STMicroelectronics. Фірма STMicroelectronics є одним із лідерів даного сегменту ринку. Даний мікроконтролер є оптимальним за співвідношенням ціна \ продуктивність та за співвідношенням ціна \ можливості периферії мікроконтролера. Даний мікроконтролер має запас за продуктивністю та можливостями периферії для подальшого покращення характеристик приладу за рахунок оптимізації електричної схеми та програмного забезпечення.

Для написання програмного забезпечення для мікроконтролера було використано середовище розробки фірми STMicroelectronics STM32CubeIDE. Це середовище розробки дозволяє зробити початкову конфігурацію периферії мікроконтролера та прискорити швидкість розробки програмного забезпечення. Дане середовище розробки дозволяє включити додаткові компоненти програмного забезпечення, такі як операційна система FreeRTOS. Ця операційна система є багатозадачною реального часу для систем, що вбудовуються. FreeRTOS призначена для роботи на масових мікроконтролерах, які можуть мати низьку швидкодію, малий обсяг оперативної пам'яті, відсутність пристроїв керування пам'яті та реалізованих на апаратному рівні механізмів підтримки багатозадачності, у тому числі швидкого перемикання контексту.

3.2 Основні характеристики операційної системи для забезпечення роботи мікроконтролера STM32G071CBT6

Основні характеристики операційної системи FreeRTOS.

1. Планування задач в FreeRTOS має три типи багатозадачності:
 - витісняючу;
 - кооперативну;
 - гібридну.
2. Розмір ядра FreeRTOS складає всього 4 - 9 Кбайт, залежно від типу платформи та налаштувань ядра.
3. FreeRTOS написана мовою програмування «C» (початковий код ядра представлений у вигляді лише чотирьох «C» файлів).
4. Підтримує завдання (tasks) та співпрограми (coroutines). Співпрограми спеціально створені для мікроконтролерів з малим обсягом оперативної пам'яті.
5. Багато можливостей трасування роботи операційної системи.
6. Можливість відстеження факту переповнення стека.
7. Відсутність програмних обмежень на кількість завдань, що одночасно виконуються.
8. Відсутність програмних обмежень на кількість пріоритетів завдань.
9. Відсутність обмежень у використанні пріоритетів: кільком завданням може бути призначений однаковий пріоритет.
10. Розвинені засоби синхронізації «завдання – завдання» та «завдання – переривання»:
 - черги;
 - двійкові семафори;
 - лічильні семафори;
 - рекурсивні семафори;
 - м'ютекси.
11. М'ютекси з наслідуванням пріоритету.

12. Підтримка модуля захисту пам'яті (MPU) в процесорах Cortex-M3.

13. Постачається з налагодженими прикладами проектів для кожного порту та кожного середовища розробки.

14. FreeRTOS повністю безкоштовна, модифікована ліцензія GPL дозволяє використовувати FreeRTOS у проектах без розкриття вихідних кодів.

Робота планувальника задач операційної системи FreeRTOS в режимі багатозадачності, при режимі витіснення, має багато спільного з алгоритмом перемикання потоків в сучасних операційних системах загального призначення. Витісняюча багатозадачність передбачає, що будь-яке завдання з низьким пріоритетом переривається завданням з більш високим пріоритетом. Як тільки високопріоритетне завдання виконало свої дії, воно завершує свою роботу або переходить у стан очікування, і управління знову отримує завдання з більш низьким пріоритетом. Перемикання між завданнями здійснюється через рівні кванти часу роботи планувальника, тобто високопріоритетне завдання, як тільки готове до виконання, очікує закінчення поточного кванта, після чого управління отримує планувальник, який дозволяє роботу високопріоритетному завданню. Таким чином, час реакції FreeRTOS на зовнішні події в режимі багатозадачності, з функцією витіснення – не більше одного кванта часу планувальника, який можна задавати в налаштуваннях. За умовчанням квант часу дорівнює 1 мс. Якщо готові до виконання кілька завдань з однаковим пріоритетом, то в такому випадку планувальник виділяє кожному з них по одному кванту часу, після якого управління отримує наступне завдання, і так далі по колу.

Кооперативна багатозадачність відрізняється від того, що планувальник самостійно не може перервати виконання поточного завдання, навіть якщо з'явилося готове до виконання завдання з вищим пріоритетом. Кожне завдання має самостійно передати управління планувальнику. Таким чином, високопріоритетне завдання чекатиме, поки низькопріоритетне завершить свою роботу і віддасть управління планувальнику. Час реакції системи на зовнішню подію стає невизначеним і залежить від того, як довго поточне

завдання виконуватиметься до передачі управління. Витісняюча та кооперативна концепції багатозадачності об'єднуються разом у гібридний вигляд багатозадачності – коли виклик планувальника відбувається кожного кванту часу, але, на відміну від багатозадачності, з режимом витіснення, програміст має можливість зробити це примусово в тілі завдання. Особливо корисний цей режим, коли необхідно скоротити час реакції системи на переривання. Припустимо, зараз виконується низькопріоритетна задача, а високопріоритетна очікує настання деякого переривання. Далі відбувається переривання, але після закінчення роботи обробника переривань виконання повертається до поточного низькопріоритетного завдання, а високопріоритетне чекає, поки закінчиться поточний квант часу. Однак якщо після виконання обробником переривання управління передається планувальнику, він передасть управління високопріоритетній задачі, що дозволяє значно скоротити час реакції системи на переривання, пов'язане із зовнішньою подією.

На рис. 3.1. зображено перехід завдань у різні стани.

Весь вихідний код ядра знаходиться у директорії /Source. Його становлять такі файли:

1. tasks.c – планувальник, реалізація механізму завдань.
2. queue.c – реалізація черг.
3. list.c – внутрішні потреби планувальника, проте функції можуть використовуватися також в прикладних програмах.
4. croutine.c – реалізація співпрограм (може бути відсутнім у разі, якщо співпрограми не використовуються).

Заголовні файли, що знаходяться в директорії Source/Include:

1. tasks.h, queue.h, list.h, croutine.h – заголовні файли відповідно для однойменних файлів з кодом.
2. FreeRTOS.h – містять препроцесорні директиви для налаштування компіляції.

3. `mpu_wrappers.h` – містить перевизначення функцій програмного інтерфейсу (API функцій) FreeRTOS підтримки модуля захисту пам'яті (MPU).
4. `portable.h` – платформно залежні налаштування.
5. `projdefs.h` – інші системні визначення.
6. `semphr.h` – визначає API функції для роботи з семафорами, які реалізовані на основі черг.
7. `StackMacros.h` – містить макроси для контролю переповнення стека.

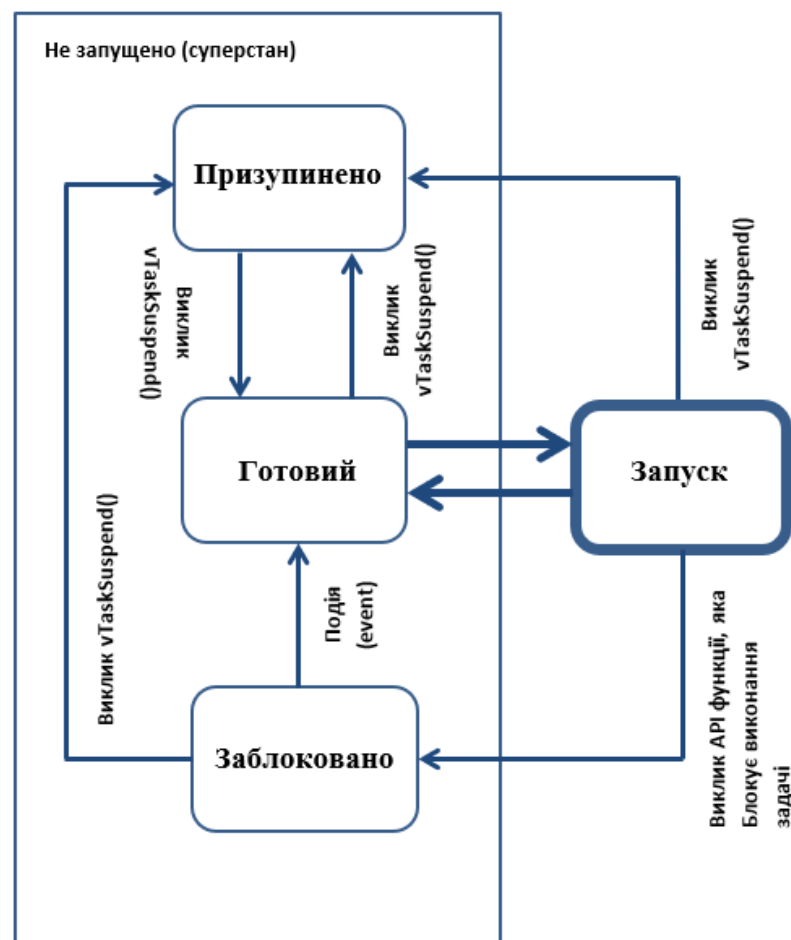


Рисунок 3.1 – Зображення перехід завдань у різні стани

Застосування операційної системи FreeRTOS для мікроконтролера дозволяє прискорити розробку та гнучкість програмного забезпечення.

Приклад ініціалізації FreeRTOS за допомогою конфігуратора зображено на рис. 3.2.

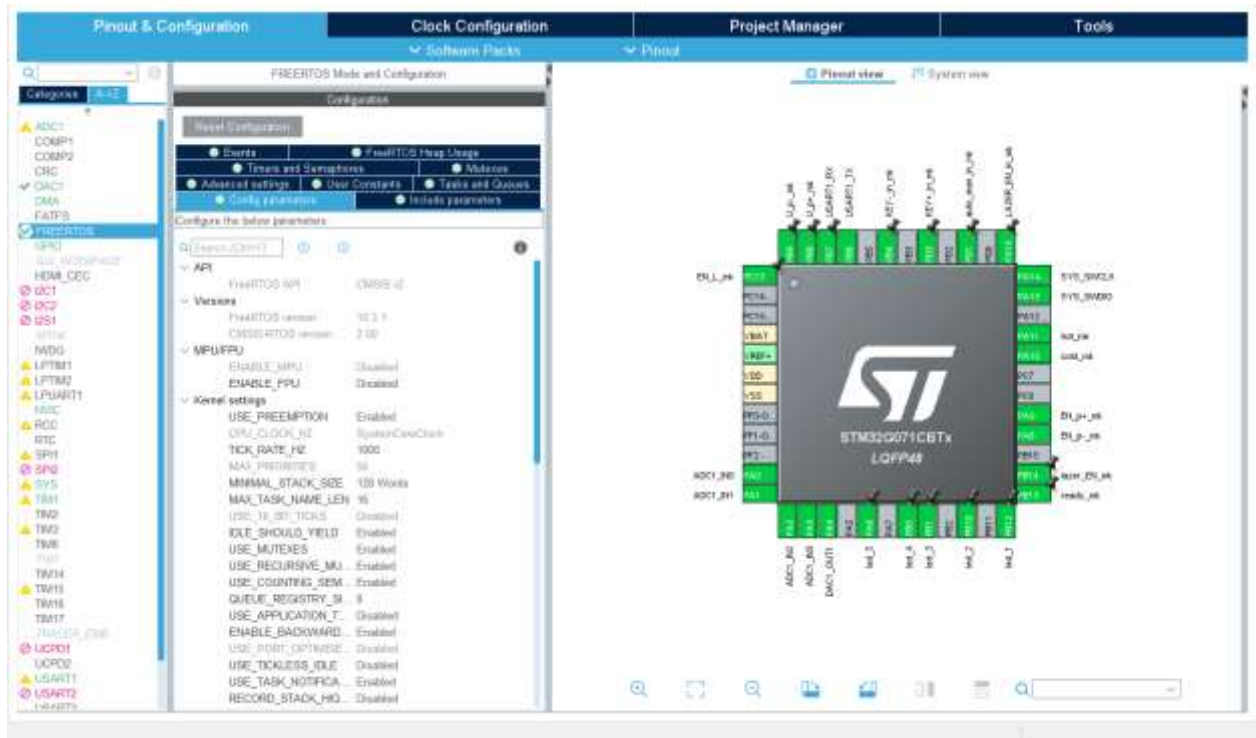


Рисунок 3.2 – Зображення ініціалізації FreeRTOS за допомогою конфігуратора

Конфігуратор середовища розробки створює код конфігурації FreeRTOS:

```
#ifndef FREERTOS_CONFIG_H
#define FREERTOS_CONFIG_H
#if defined(__ICCARM__) || defined(__CC_ARM) || defined(__GNUC__)
#include<stdint.h>
extern uint32_t SystemCoreClock;
#endif
#ifndef CMSIS_device_header
#define CMSIS_device_header "stm32g0xx.h"
#endif /* CMSIS_device_header */

#define configENABLE_FPU 0
#define configENABLE_MPU 0

#define configUSE_PREEMPTION 1
#define configSUPPORT_STATIC_ALLOCATION 1
#define configSUPPORT_DYNAMIC_ALLOCATION 1
#define configUSE_IDLE_HOOK 0
#define configUSE_TICK_HOOK 0
#define configCPU_CLOCK_HZ ( SystemCoreClock )
#define configTICK_RATE_HZ ((TickType_t)1000)
#define configMAX_PRIORITIES ( 56 )
#define configMINIMAL_STACK_SIZE ((uint16_t)128)
#define configTOTAL_HEAP_SIZE ((size_t)6144)
#define configMAX_TASK_NAME_LEN ( 16 )
#define configUSE_TRACE_FACILITY 1
#define configUSE_16_BIT_TICKS 0
```

```

#define configUSE_MUTEXES 1
#define configQUEUE_REGISTRY_SIZE 8
#define configUSE_RECURSIVE_MUTEXES 1
#define configUSE_COUNTING_SEMAPHORES 1
#define configUSE_PORT_OPTIMISED_TASK_SELECTION 0
#define configMESSAGE_BUFFER_LENGTH_TYPE size_t
#define configUSE_CO_ROUTINES 0
#define configMAX_CO_ROUTINE_PRIORITIES ( 2 )

/* Software timer definitions. */
#define configUSE_TIMERS 1
#define configTIMER_TASK_PRIORITY ( 2 )
#define configTIMER_QUEUE_LENGTH 10
#define configTIMER_TASK_STACK_DEPTH 256

/* CMSIS-RTOS V2 flags */
#define configUSE_OS2_THREAD_SUSPEND_RESUME 1
#define configUSE_OS2_THREAD_ENUMERATE 1
#define configUSE_OS2_EVENTFLAGS_FROM_ISR 1
#define configUSE_OS2_THREAD_FLAGS 1
#define configUSE_OS2_TIMER 1
#define configUSE_OS2_MUTEX 1
#define INCLUDE_vTaskPrioritySet 1
#define INCLUDE_uxTaskPriorityGet 1
#define INCLUDE_vTaskDelete 1
#define INCLUDE_vTaskCleanUpResources 0
#define INCLUDE_vTaskSuspend 1
#define INCLUDE_vTaskDelayUntil 1
#define INCLUDE_vTaskDelay 1
#define INCLUDE_xTaskGetSchedulerState 1
#define INCLUDE_xTimerPendFunctionCall 1
#define INCLUDE_xQueueGetMutexHolder 1
#define INCLUDE_uxTaskGetStackHighWaterMark 1
#define INCLUDE_xTaskGetCurrentTaskHandle 1
#define INCLUDE_eTaskGetState 1
#define USE_FreeRTOS_HEAP_4
#define configASSERT( x ) if ((x) == 0) {taskDISABLE_INTERRUPTS(); for( ;; );}
#define vPortSVCHandler SVC_Handler
#define xPortPendSVHandler PendSV_Handler
#define USE_CUSTOM_SYSTICK_HANDLER_IMPLEMENTATION 0

#endif/* FREERTOS_CONFIG_H */

```

У цій конфігурації частота перемикання контекстів операційної системи складає 1КГц, що є оптимальним значенням для виконання даної задачі. Для розподілу завдань, які виконує мікроконтролер, було створено та ініціалізовано 8 контекстів. Їх прототипи виглядають так:

```

void StartLedTask(void *argument);
void StartMain(void *argument);
void StartKey(void *argument);
void StartUartTX(void *argument);
void StartUartRX(void *argument);
void StartAdcTask(void *argument);
void StartPowerTask(void *argument);

void StartNRF24Task(void *argument);

```

Для взаємодії між контекстами були створені семафори та черги повідомлень, їх ініціалізація виглядають так:

```
myBinarySem01Handle = osSemaphoreNew(1, 1, &myBinarySem01_attributes);
myBinarySemAdcConvCpltHandle = osSemaphoreNew(1, 1,
&myBinarySemAdcConvCplt_attributes);
myBinarySemAdcErrorHandle = osSemaphoreNew(1, 1, &myBinarySemAdcError_attributes);
myBinarySemStopKeyHandle = osSemaphoreNew(1, 1, &myBinarySemStopKey_attributes);
myCountingSem01Handle = osSemaphoreNew(5, 5, &myCountingSem01_attributes);

key2mainHandle = osMessageQueueNew (16, sizeof(MSGQUEUE_OBJ_u8_t),
&key2main_attributes);
adc2powHandle = osMessageQueueNew (16, sizeof(MSGQUEUE_OBJ_u16_t),
&adc2pow_attributes);
```

3.3 Алгоритм запуску операційної системи

Алгоритм запуску операційної системи FreeRTOS має послідовний характер, та відповідає рис. 3.3.

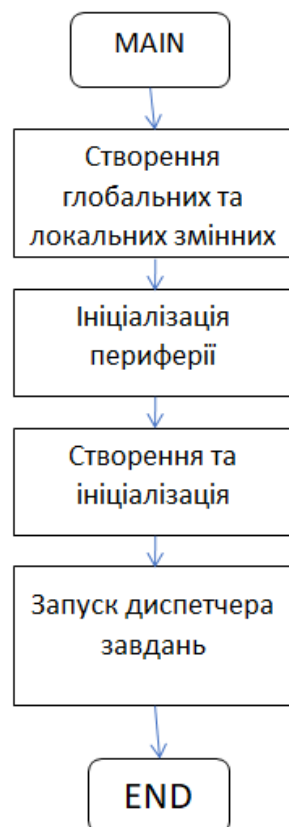


Рисунок 3.3 – Алгоритм запуску операційної системи FreeRTOS

Реалізація в коді алгоритму, зображеного на рис.2.3 виглядає так:

```
#include "main.h"
#include "cmsis_os.h"
#include "adc.h"
#include "dma.h"
#include "i2c.h"
#include "spi.h"
#include "usart.h"
#include "gpio.h"
#include "NRF24.h"
#include "L3GD20_task.h"
#include "tm_stm32f4_l3gd20.h"

uint8_t dev_power = dev_bead;

char str1[20]={0};
uint8_t buf1[10]={0x01, 0x02, 0x03, 0x04, 0x05, 0x06, 0x07, 0x08,0x09, 0x10};
TM_L3GD20_t L3GD20_Data_filtered;
uint8_t napravlenie= napravlenie_stop;
uint32_t v_in_led=0;
void SystemClock_Config(void);
void MX_FREERTOS_Init(void);
int main(void)
{
    uint8_t retr_cnt=0, dt=0;
    uint16_t i_nrf=1,retr_cnt_full=0;

    HAL_Init();

    SystemClock_Config();

    MX_GPIO_Init();
    MX_DMA_Init();
    MX_ADC1_Init();
    MX_I2C1_Init();
    MX_SPI1_Init();
    MX_SPI2_Init();
    MX_USART1_UART_Init();

    osKernelInitialize();
    MX_FREERTOS_Init();
    osKernelStart();
    while (1)
    {
    }
}
```

3.4 Алгоритм роботи термостабілізації лазерного діода

Конфігуратор середовища розробки дозволяє зробити початкове налаштування периферії. Для підвищення точності приладу та універсальності було застосовано модуль лазерного діода з елементом Пельтьє для організації

термостабілізації. Елемент Пельтьє включений за мостовою схемою живлення, що дозволяє як охолоджувати, так і підігрівати лазерний діод, що сприяє стабілізації його характеристик при змінах зовнішньої температури. Для дозування енергії, яка надходить на елемент Пельтьє, застосоване кероване джерело живлення. Сигнал керування формує таймер №1. Початкова конфігурація таймера у STM32CubeIDE зображена на рис. 3.4.

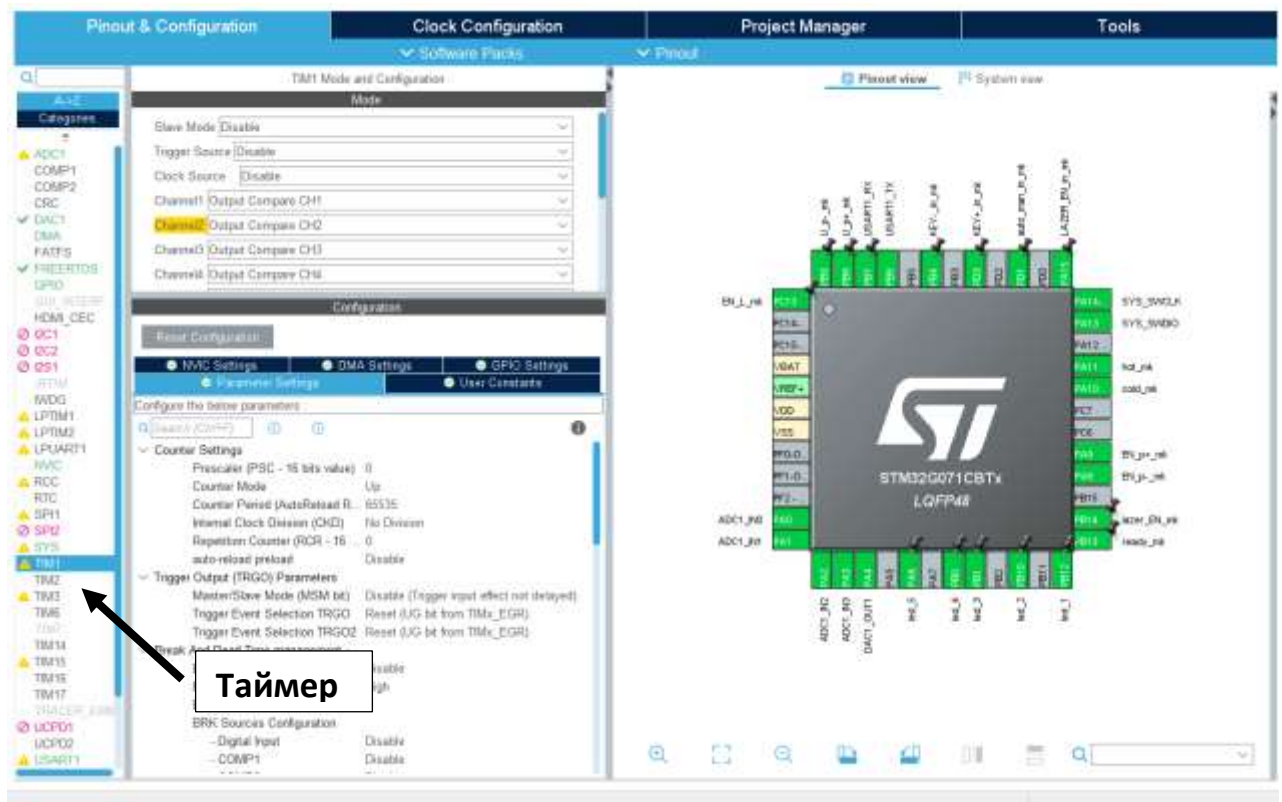


Рисунок 3.4 – Початкова конфігурація таймера у STM32CubeIDE

Вихідний код ініціалізації, сформований конфігуратором для таймера №1:

```
/* TIM1_init function */
void MX_TIM1_Init(void)
{
    TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = {0};
    TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC = {0};
    TIM_BreakDeadTimeConfigTypeDef sBreakDeadTimeConfig = {0};
    htim1.Instance = TIM1;
    htim1.Init.Prescaler = 640-1;
    htim1.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
    htim1.Init.Period = 100;
```

```

htim1.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
htim1.Init.RepetitionCounter = 0;
htim1.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_ENABLE;
if (HAL_TIM_PWM_Init(&htim1) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
sMasterConfig.MasterOutputTrigger2 = TIM_TRGO2_RESET;
sMasterConfig.MasterSlaveMode = TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim1, &sMasterConfig) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
sConfigOC.OCMode = TIM_OCMODE_PWM1
sConfigOC.Pulse = 30;
sConfigOC.OCpolarity = TIM_OCPOLARITY_HIGH;
sConfigOC.OCNPolarity = TIM_OCNPOLARITY_HIGH;
sConfigOC.OCFastMode = TIM_OCFAST_DISABLE;
sConfigOC.OCIdleState = TIM_OCIDLESTATE_RESET;
sConfigOC.OCNIdleState = TIM_OCNIDLESTATE_RESET;
if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel (&htim1, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_1) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel (&htim1, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_2) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
if ( HAL_TIM_PWM_ConfigChannel (&htim1, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_3) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim1, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_4) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
sBreakDeadTimeConfig.OffStateRunMode = TIM_OSSR_DISABLE;
sBreakDeadTimeConfig.OffStateIDLEMode = TIM_OSSI_DISABLE;
sBreakDeadTimeConfig.LockLevel = TIM_LOCKLEVEL_OFF;
sBreakDeadTimeConfig.DeadTime = 0;
sBreakDeadTimeConfig.BreakState = TIM_BREAK_DISABLE;
sBreakDeadTimeConfig.BreakPolarity = TIM_BREAKPOLARITY_HIGH;
sBreakDeadTimeConfig.BreakFilter = 0;
sBreakDeadTimeConfig.BreakAFMode = TIM_BREAK_AFMODE_INPUT;
sBreakDeadTimeConfig.Break2State = TIM_BREAK2_DISABLE;
sBreakDeadTimeConfig.Break2Polarity = TIM_BREAK2POLARITY_HIGH;
sBreakDeadTimeConfig.Break2Filter = 0;
sBreakDeadTimeConfig.Break2AFMode = TIM_BREAK_AFMODE_INPUT;
sBreakDeadTimeConfigAutomaticOutput = TIM_AUTOMATICOUTPUT_DISABLE;
if (HAL_TIMEx_ConfigBreakDeadTime(&htim1, &sBreakDeadTimeConfig) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
/* USER CODE BEGIN TIM1_Init 2 */

/* USER CODE END TIM1_Init 2 */
HAL_TIM_MspPostInit(&htim1);

}

```

Ініціалізація та запуск таймера здійснюється на початку головного потоку:

```
MX_TIM1_Init();
//
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, 0);
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_2, 0);
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_3, 0);
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_4, 0);
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_2);
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_3);
HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_4);
```

Таймер №1 налаштований працювати в ШІМ (широотно-імпульсна модуляція) режимі. Змінюючи коефіцієнт заповнення ШІМ сигналу управління джерела живлення – проводиться регулювання кількості енергії, яка надходить на елемент Пельтьє. Розрахунок коефіцієнта заповнення таймера №1 проводиться з урахуванням поточної температури кристала лазерного діода із застосуванням ПІД (пропорційно-інтегрально-диференційний) регулятора. Коефіцієнти для ПІД регулятора були отримані шляхом тестування пристрою. Ініціалізація та коефіцієнти ПІД регулятора мають такі значення:

```
PIDInit(&pid_for_peltie, 10, 3, 10, 0.01, 0, 20, AUTOMATIC, REVERSE);
```

Функція розрахунку ПІД регулятора реалізована таким чином:

```
BoolPIDCompute(PIDControl *pid)
{
    float error, dInput;

    if(pid->mode == MANUAL)
    {
        return false;
    }
    error = (pid->setpoint) - (pid->input);
    pid->iTerm += (pid->alteredKi) * error;
    pid->iTerm = CONSTRAIN( (pid->iTerm), (pid->outMin), (pid->outMax) );
    dInput = (pid->input) - (pid->lastInput);
    pid->output = (pid->alteredKp) * error + (pid->iTerm) - (pid->alteredKd) * dInput;
    pid->output = CONSTRAIN( (pid->output), (pid->outMin), (pid->outMax) );
    pid->lastInput = pid->input;
    return true;
}
```

3.5 Алгоритм реалізації підтримки заданої температури кристала лазерного діода

Окремим завданням роботи оптоволоконного гіроскопа винесено: підвищення точності підтримання температури кристала лазерного діода та забезпечення гнучкості роботи програми. При старті цієї задачі відбувається ініціалізація локальних змінних і починається нескінченний цикл підтримки температури [20–23]. Цей цикл містить такі етапи роботи.

1. Отримання температури кристала.
 2. Порівняння поточної температури із заданою з урахуванням допуску. Якщо температура в межах допуску – починається нова ітерація циклу (рис. 3.5).
 3. Якщо температура кристалу знаходиться за межами допуску, то визначається, який режим роботи необхідний: підігрів або охолодження. Блок живлення перемикається у відповідний режим роботи.
 4. На основі поточної та необхідної температури проводиться розрахунок коефіцієнта заповнення ШІМ для таймера за допомогою ПІД регулятора.
 5. Коригується робота таймера та починається нова ітерація циклу.
- Описаний вище алгоритм, зображено на рис. 3.5

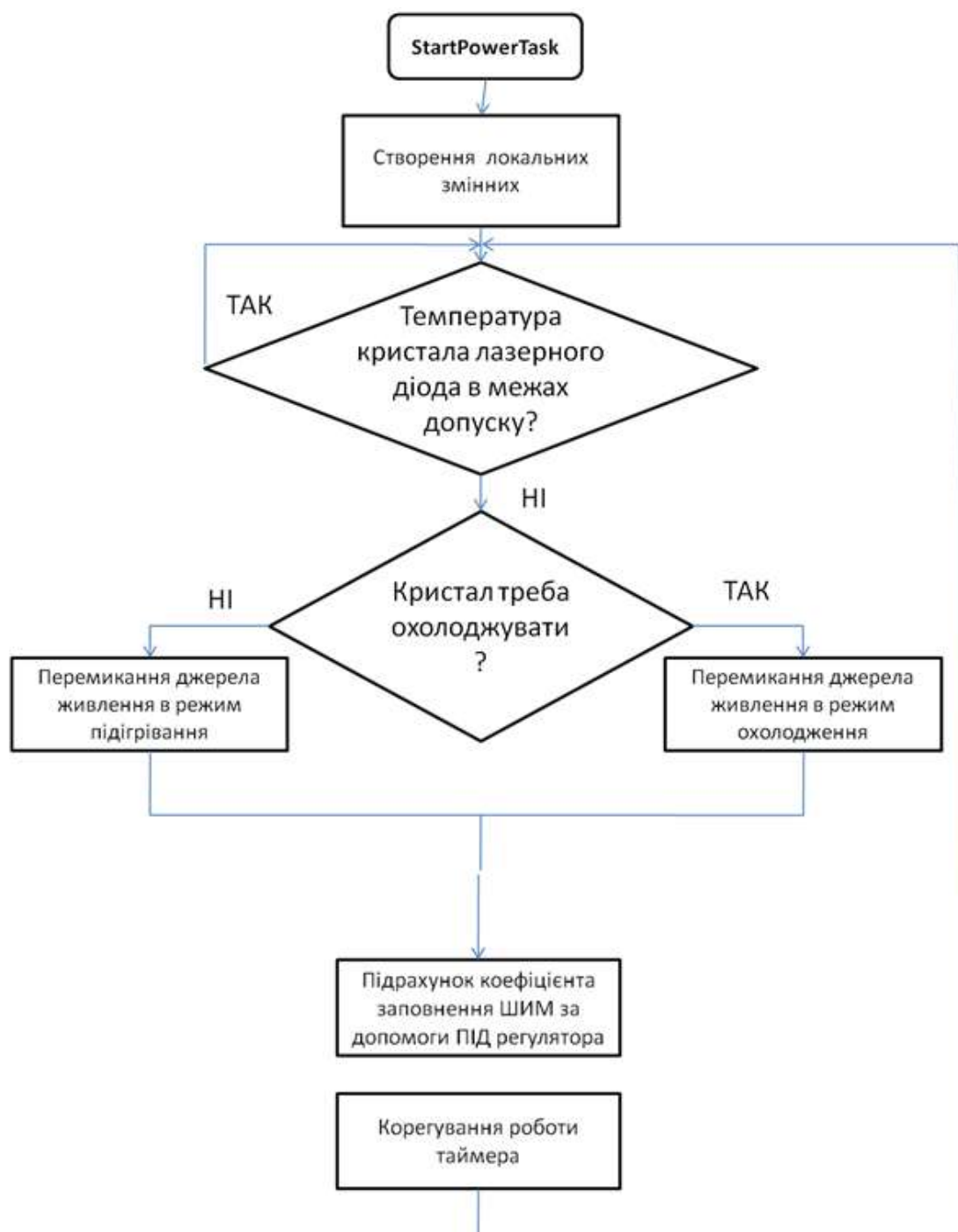


Рисунок 3.5 – Алгоритм підтримки заданої температури кристала лазерного діода

3.6 Алгоритм обробки сигналів фотодіода та передачі на персональний комп'ютер

Однією з головних задач мікроконтролера при обробці сигналів отриманих за допомогою фотодіода – оцифровування значень напруги, отриманих при за світці його активного елементу лазерним випромінюванням. Використаний мікроконтролер STM32G071 має АЦП (аналого-цифровий перетворювач) з роздільною здатністю 12 bit, з максимальною швидкістю вибірок ~ 2 MSps. Для підвищення точності значень, які отримуються в результаті оцифровування, швидкість вибірок знижена за допомогою дільника частоти тактування, вбудованого в АЦП, до рекомендованого фірмою виробником значення 1 MSps.

Ініціалізація АЦП в коді має вигляд:

```
void MX_ADC1_Init(void)
{

    ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};

    hadc1.Instance = ADC1;
    hadc1.Init.ClockPrescaler = ADC_CLOCK_ASYNC_DIV16;
    hadc1.Init.Resolution = ADC_RESOLUTION_12B;
    hadc1.Init.DataAlign = ADC_DATAALIGN_RIGHT;
    hadc1.Init.ScanConvMode = ADC_SCAN_DISABLE;
    hadc1.Init.EOCSelection = ADC_EOC_SINGLE_CONV;
    hadc1.Init.LowPowerAutoWait = DISABLE;
    hadc1.Init.LowPowerAutoPowerOff = DISABLE;
    hadc1.Init.ContinuousConvMode = DISABLE;
    hadc1.Init.NbrOfConversion = 1;
    hadc1.Init.DiscontinuousConvMode = DISABLE;
    hadc1.Init.ExternalTrigConv = ADC_SOFTWARE_START;
    hadc1.Init.ExternalTrigConvEdge = ADC_EXTERNALTRIGCONVEDGE_NONE;
    hadc1.Init.DMAContinuousRequests = DISABLE;
    hadc1.Init.Overrun = ADC_OVR_DATA_OVERRITTEN;
    hadc1.Init.SamplingTimeCommon1 = ADC_SAMPLETIME_12CYCLES_5;
    hadc1.Init.SamplingTimeCommon2 = ADC_SAMPLETIME_12CYCLES_5;
    hadc1.Init.OversamplingMode = ENABLE;
    hadc1.Init.Oversampling.Ratio = ADC_OVERSAMPLING_RATIO_16;
    hadc1.Init.Oversampling.RightBitShift = ADC_RIGHTBITSHIFT_NONE;
    hadc1.Init.Oversampling.TriggeredMode = ADC_TRIGGEREDMODE_SINGLE_TRIGGER;
    hadc1.Init.TriggerFrequencyMode = ADC_TRIGGER_FREQ_HIGH;
    if (HAL_ADC_Init(&hadc1) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    /** Configure Regular Channel
    */
    sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_0;
```

```

sConfig.Rank = ADC_REGULAR_RANK_1;
sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLINGTIME_COMMON_1;
if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK)
{
    Error_Handler();
}
}

```

Запуском і синхронізацією роботи АЦП управляє таймер №6. Таймер налаштований так, щоб із частотою 5кГц надавати дозвіл на запуск чергового перетворення АЦП. Аналого-цифровий перетворювач налаштований на поодинокі перетворення сигналів за командою таймера №6. Після завершення перетворення сигналу, АЦП за допомогою DMA(безпосередній доступ до пам'яті) передає поточне значення в буфер обсягом 50 значень. За фактом наповнення даного буфера – DMA створює переривання та запускається процедура фільтрації значень за допомогою фільтра, що їх усереднює. Фільтр з функцією усереднення – є оптимальним для задачі: зменшення випадкового шуму при збереженні різкості ступінчастого відгуку. Реалізації такого фільтра мовою C має вигляд:

```

#define MVF_LENGTH 10
typedef float E_SAMPLE;
typedef struct _t_MAF
{
    E_SAMPLE buffer[MVF_LENGTH];
    E_SAMPLE sum;
    int index;
}t_MAF;

void moving_average_filter_init(t_MAF * pMaf)
{
    pMaf->index = -1;
    pMaf->sum = 0;
}
E_SAMPLE moving_average_filter(t_MAF * pMaf,E_SAMPLE xn)
{
    E_SAMPLE yn=0;
    int i=0;
    if(pMaf->index == -1)
    {
        for(i = 0; i < MVF_LENGTH; i++)
        {

```

```

    pMaf->buffer[i] = xn;
}
pMaf->sum = xn*MVF_LENGTH;
pMaf->index = 0;
}
else
{
    if(xn>100)
        xn = xn+0.1;
    pMaf->sum -= pMaf->buffer[pMaf->index];
    pMaf->buffer[pMaf->index] = xn;
    pMaf->sum += xn;
    pMaf->index++;
    if(pMaf->index>=MVF_LENGTH)
        pMaf->index = 0;
}
yn = pMaf->sum/MVF_LENGTH;
return yn;
}

```

Для визначення напрямку обертання гіроскопа застосована мікросхема цифрового гіроскопа L3GD20.

Ініціалізація L3GD20 виконується за допомогою коду, написаного на мові C та має вигляд:

```

{
    /* Init CS pin */
    TM_L3GD20_INT_InitPins();
    /* Init SPI */
    //TM_SPI_Init(L3GD20_SPI, L3GD20_SPI_PINSPACK);
    /* Check if sensor is L3GD20 */
    if (TM_L3GD20_INT_ReadSPI(L3GD20_REG_WHO_AM_I) != L3GD20_WHO_AM_I)
    {
        /* Sensor connected is not L3GD20 */
        return TM_L3GD20_Result_Error;
    }

    /* Enable L3GD20 Power bit */
    TM_L3GD20_INT_WriteSPI(L3GD20_REG_CTRL_REG1, 0xFF);

    /* Set L3GD20 scale */
    if (scale == TM_L3GD20_Scale_250)
    {
        TM_L3GD20_INT_WriteSPI(L3GD20_REG_CTRL_REG4, 0x00);
    }
    elseif (scale == TM_L3GD20_Scale_500)
    {
        TM_L3GD20_INT_WriteSPI(L3GD20_REG_CTRL_REG4, 0x10);
    }
    elseif (scale == TM_L3GD20_Scale_2000)
    {
        TM_L3GD20_INT_WriteSPI(L3GD20_REG_CTRL_REG4, 0x20);
    }
}

```

```

}

/* Save scale */
TM_L3GD20_INT_Scale = scale;

/* Set high-pass filter settings */
TM_L3GD20_INT_WriteSPI(L3GD20_REG_CTRL_REG2, 0x00);

/* Enable high-pass filter */
TM_L3GD20_INT_WriteSPI(L3GD20_REG_CTRL_REG5, 0x10);

/* Everything OK */
return TM_L3GD20_Result_Ok;
}

```

Після обробки даних з фотодіода та визначення напрямку обертання гіроскопа, дані готуються та відправляються радіоканалом на плату прийому оброблення даних. Радіоканал між платою обробки даних та платою прийому оброблених даних реалізований на базі мікросхем NRF24L01. Застосування радіоканалу дозволило застосувати стенд для випробувань гіроскопа. Гіроскоп був закріплений на стенді для обертання та оцінки стабільності вихідних показників при різних швидкостях обертання протягом тривалого часу. Ініціалізація мікросхеми NRF24L01 виконується за допомогою коду, написаного на мові C та має вигляд:

```

void NRF24_ini(void)
{
    CE_RESET;
    DelayMicro(50000);
    NRF24_WriteReg(CONFIG, 0x0a); // Set PWR_UP bit, enable CRC(1 byte) & Prim_RX:0
    (Transmitter)
    DelayMicro(50000);
    NRF24_WriteReg(EN_AA, 0x01); // Enable Pipe0
    NRF24_WriteReg(EN_RXADDR, 0x01); // Enable Pipe0
    NRF24_WriteReg(SETUP_AW, 0x01); // Setup address width=3 bytes
    NRF24_WriteReg(SETUP_RETR, 0x5F); // // 1500us, 15 retrans
    NRF24_ToggleFeatures();
    NRF24_WriteReg(FEATURE, 0);
    NRF24_WriteReg(DYNPD, 0);
    NRF24_WriteReg(STATUS, 0x70); //Reset flags for IRQ
    NRF24_WriteReg(RF_CH, 76); // частота 2476 MHz
    NRF24_WriteReg(RF_SETUP, 0x06); //TX_PWR:0dBm, Datarate:1Mbps
    NRF24_WriteBuf(TX_ADDR, TX_ADDRESS, TX_ADR_WIDTH);
    NRF24_WriteBuf(RX_ADDR_P0, TX_ADDRESS, TX_ADR_WIDTH);
    NRF24_WriteReg(RX_PW_P0, TX_PLOAD_WIDTH); //Number of bytes in RX payload in
    data pipe 0

    NRF24L01_RX_Mode();
    // LED_OFF;
}

```

4 ЯКІСТЬ НАМОТКИ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ГІРОСКОПУ

4.1 Волоконно-оптичний контур

Волоконно-оптичний контур є катушкою оптичного волокна з квадрупольним методом намотування. Він використовується як чутливий елемент волоконно-оптичного гіроскопа (ВОГ), який отримує все більше поширення в інерційних системах навігації, управління та стабілізації [24–26].

Для зниження впливу температури на характеристики ВОГ використовується спеціальне квадрупольне намотування оптичного волокна на катушку: рівновіддалені від середини катушки ділянки волокна розміщуються максимально близько. За такого способу необхідно поперемінно намотувати на катушку волокно в різні боки від середини (праве та ліве плече).

Можна виділити ряд факторів, що ускладнюють процес створення контуру:

- малий діаметр використовуваного волокна, що значно ускладнює візуальний контроль;
- наявність у волокні внутрішніх напруг;
- велика довжина волокна, що намотується;
- недосконалість технології намотування волоконного контуру,
- специфіка квадрупольного методу намотування.

Під параметрами якості намотування розуміються такі властивості чутливого елемента ВОГ, які впливають вихідні характеристики самого гіроскопа:

- сумарна довжина волоконного контуру;
- співвідношення довжини лівого та правого плеча контуру;
- кількість різних дефектів намотування.

4.2 Дефекти намотки оптичного волокна на катушку

Волоконно-оптичний контур складається з N шарів волокна, діаметр кожного з яких більше за діаметр попереднього шару [27–29]. Як наслідок, і довжина волокна наступного шару має бути більше довжини волокна:

$$L = \sqrt{\pi^2 (D_K + D_B(1 + (N - 1)\sqrt{3}))^2 + D_B^2 n}, \quad (4.1)$$

де D_K – діаметр каркаса робочої катушки;

D_B – діаметр волокна;

n – число витків в одному шарі.

Були оброблені дані, отримані в процесі намотування шести волоконно-оптичних контурів з використанням фотоелектричного датчика довжини, що має похибку. ± 5 мм. На рис. 4.1 для порівняння наведені теоретичні графіки (відрізки, паралельні осі абсцис) та практичних залежностей збільшення довжини волокна від номера шару (а – контур № 1; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5; е – 6). Як видно, практичні залежності мають стрибкоподібний характер. Варто зауважити, що зміна довжини відбувається як убік збільшення, так і зменшення.

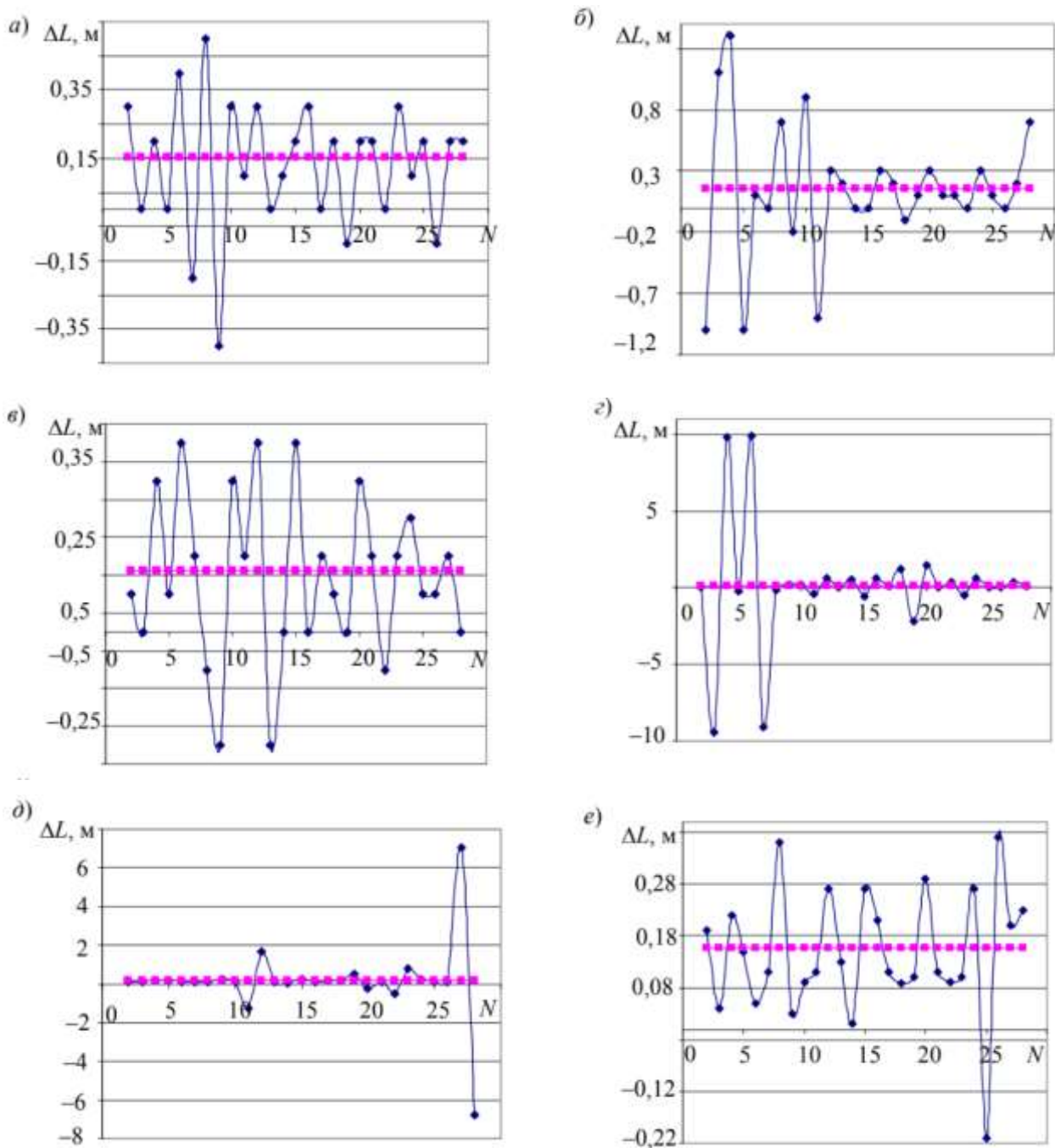


Рисунок 4.1 – Залежність довжини оптичного волокна від номеру шару

Ця обставина пояснюється, насамперед, тим, що структура волоконно-оптичного контуру містить безліч дефектів. Умовно їх можна розділити на постійні та змінні, перші обумовлені конструкцією каркаса робочої котушки, наявністю кута між волокнами, що укладаються, і бортом каркаса, чергуванням намотування лівого і правого плеча тощо. До них відносяться перескок (рис. 4.2, 1), пристінковий дефект (рис. 4.2, 2) та дефект «вихідного

волокна» (рис. 4.2, 3). Перескок характеризується регулярним усуненням волокна через виток і відбувається через різницю між поточним кутом намотування і кутом намотки витків попереднього шару. Пристінковий дефект виникає внаслідок того, що борт котушки утворює «клин» з найближчим до нього витком попереднього шару, так що виток, що безпосередньо прилягає до борту, провалюється в зоні основи «клина». «Дефект вихідного волокна» є наслідком чергування правої та лівої половини волокна при намотуванні контуру: останньому витку поточного шару необхідно огинати «вихідне» волокно останнього витка попереднього шару.

Випадкові дефекти, як правило, обумовлені великим значенням жорсткості волокна, поганою якістю намотування волокна на транспортну котушку, помилками укладача і т.д. [30–31].

Серед них розрізняють дефекти 1-го та 2-го роду. Дефект 1-го роду (рис. 4.2, 4) викликаний нерегулярним зміщенням волокна на один або кілька витків, 2-го роду - нерегулярним зміщенням волокна поверх одного з попередніх витків (рис. 4.2). На рис. 4.3 наведено приклад дефекту 1-го роду.

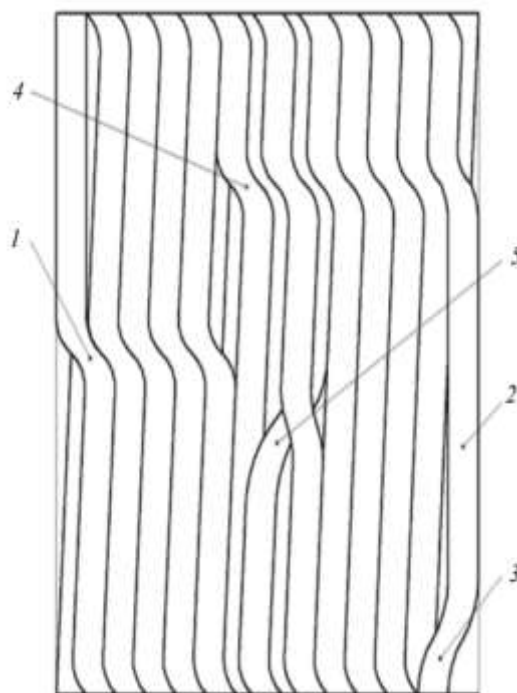


Рисунок 4.2 – Види дефектів намотування оптичного волокна на котушку



Рисунок 4.3 – Дефект 1-го роду

Найбільш значущими причинами випадкових дефектів є жорсткість волокна та якість його намотування на катушку – тобто фактори, які повністю не залежать від оператора. Було помічено, що при намотуванні контурів № 1, 3 та 6 ці умови були значно краще, ніж при намотуванні контурів № 2, 4 та 5. Як видно з рис. 4.1, залежності прирощення довжини шару від номера шару контурів другої групи характеризуються значними стрибками, які, зрештою, роблять істотний внесок у нерівність довжини лівого і правого плеча інтерферометра.

Наявність описаних дефектів у структурі квадрупольного намотування наводить, по-перше, до неоднакового збільшення довжини волокна в кожному шарі, внаслідок чого збільшується нерівність довжини плечей ВОГ, по-друге, збільшення кількості локальних вигинів волокна. Перша обставина збільшує

залежність контуру від градієнта температури, друге - підвищує розсіювання світла у хвилеводі.

4.2.1 Намотування волокна за відсутності дефектів

Розглянемо варіант ідеальної намотки – за відсутності будь-яких дефектів – і розрахуємо довжину покладеного волокна. Для цього досліджуємо структуру укладання у двох площинах:

- 1) вид на структуру укладання з торця волокон;
- 2) вид на розгорнуту площину укладання волокон.

Перший варіант (рис. 4.4, а) дає можливість розрахувати збільшення радіуса котушки (Δr) при кожному новому ряді волокна, що намотується:

$$\Delta r = \sqrt{3}R_b \quad (4.2)$$

де R_b – радіус намотуваного волокна.

З урахуванням виразу (4.2) можна обчислити радіус ряду N волокна, що намотується на котушку:

$$R_N = R_k + R_b + (N - 1)\Delta r = R_k + R_b + (N - 1) \cdot R_b, \quad (4.3)$$

де R_k – радіус котушки.

Вид на розгорнуту площину укладання волокон (рис. 4.4, б). на рисунку P_k – довжина кола) дозволяє розрахувати збільшення довжини намотуваного волокна при кожному новому витку:

$$\Delta L^2 = (2\pi R_N)^2 + (2R_b)^2. \quad (4.4)$$

Відповідно до виразів (4.3) і (4.4) отримаємо:

$$\Delta L = \sqrt{4\pi^2 \left(R_k + R_B + (N-1)\sqrt{3 \times R_B} \right)^2 + 4R_B^2}. \quad (4.5)$$

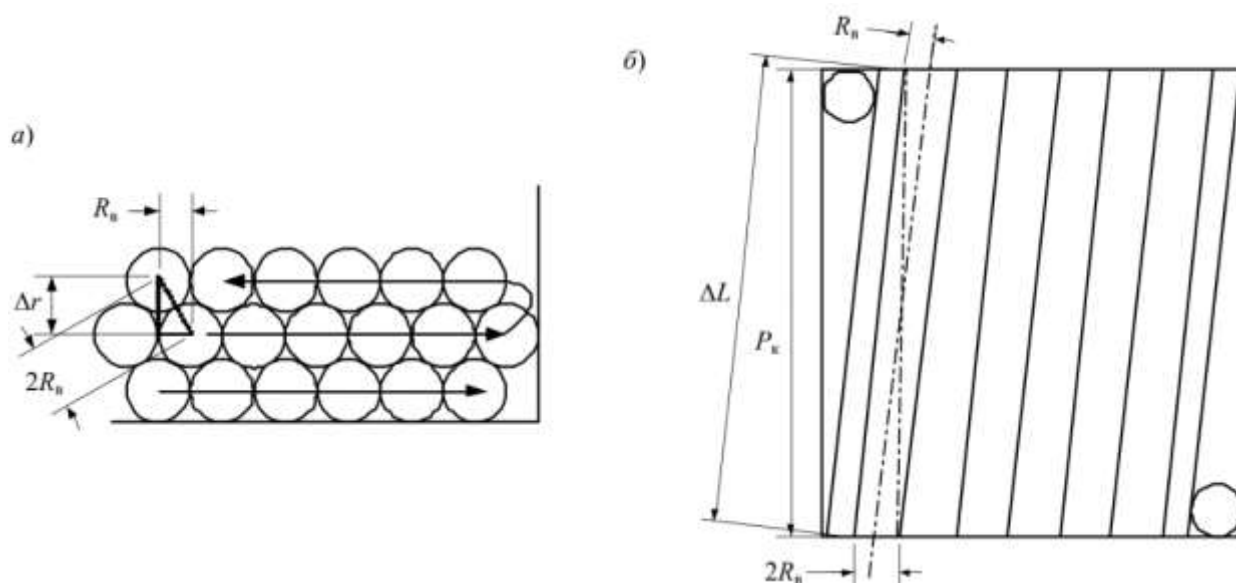


Рисунок 4.4 – Схема намотки оптичного волокна на катушку

Слід зазначити, що укладання без дефектів всієї довжини волокна практично неможливо в силу ряду причин, а саме:

- наявність зон напруженості всередині самого волокна;
- нерівномірність обертання водила і робочої катушки;
- запізнювальне автоматичне регулювання натягу.

4.2.2 Намотування волокна за наявності дефектів

Усі дефекти, що виникають у структурі квадрупольного намотування оптичного волокна, можна розділити на два види [32, 33].

1. Дефекти першого роду, викликані нерегулярним зміщенням волокна через виток у межах одного ряду, що укладається.

2. Дефекти другого роду, викликані нерегулярним зміщенням волокна поверх попереднього витка.

Дефект першого роду. На рис. 4.5, а представлений вид на структуру укладання з торця волокон за наявності дефекту першого роду.

Нерегулярне зміщення волокна через виток в межах одного ряду, що укладається викликає збільшення радіуса котушки:

$$\Delta r_{д1} = 2R_{\text{в}}. \quad (4.6)$$

Тоді радіус ряду волокна, що намотується на котушку, дорівнюватиме:

$$R_N = R_{N-1} + \Delta r_{д1} = R_{N-1} + 2R_{\text{в}}, \quad (4.7)$$

де R_{N-1} - радіус (N-1)-го ряду.

Збільшення довжини намотаного волокна за допомогою витка, при намотуванні якого мав місце дефект першого роду, можна розрахувати виходячи з виду на розгорнуту площину укладання волокон (рис. 4.5, б):

$$\Delta L_{д1}^2 = (2\pi R_N)^2 + (4R_{\text{в}})^2. \quad (4.8)$$

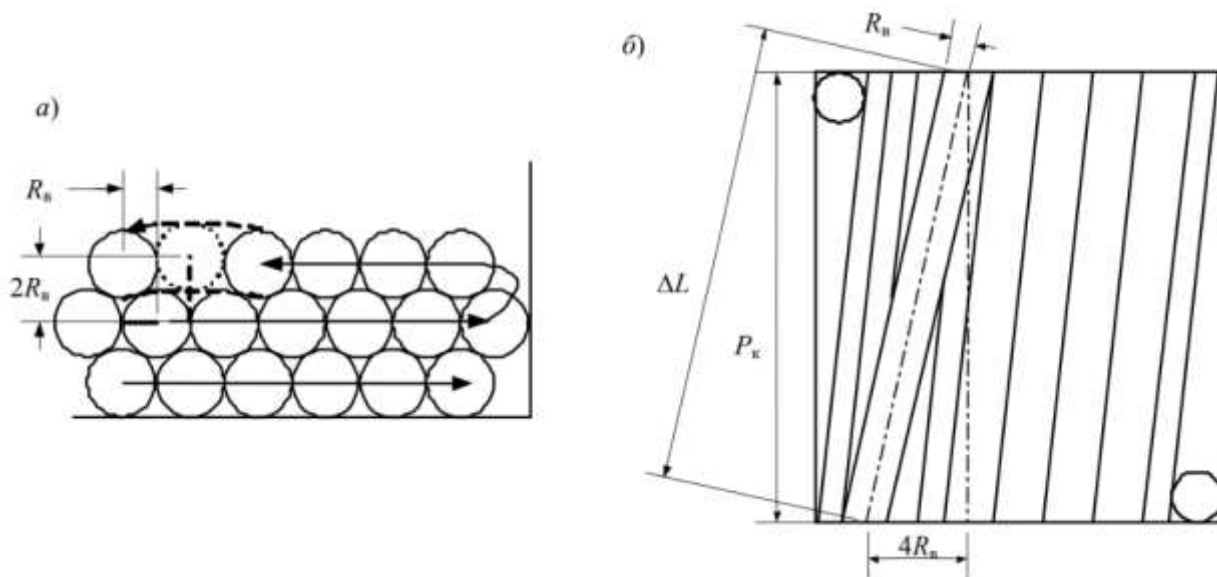


Рисунок 4.5 – Схема намотки оптичного волокна на котушку

Враховуючи рівняння (4.7), отримуємо:

$$\Delta L_{д1} = \sqrt{4\pi^2 (R_{N-1} + 2R_B)^2 + 16R_B^2} \quad (4.9)$$

Розрахуємо збільшення довжини оптичного волокна, викликане дефектом першого роду, для 3-го ряду волокна ($N = 3$). Якщо прийняти $R_K = 200$ мм, $R_B = 0,2$ мм, то відповідно до рівняння (4.7) $R_3 = 100,47$ мм. Підставивши це значення у формулу (4.8), отримаємо $\Delta L_{д1} = 630,97$ мм. Очевидно, що величина похибки, спричинена дефектом першого роду, визначається як:

$$\Delta L_{д1} = \Delta L_{д1} - \Delta L. \quad (4.10)$$

Обчисливши за рівнянням (4.5) $\Delta L = 630,80$ мм, згідно з виразом (4.10) отримаємо $\Delta L_{д1} = 0,17$ мм.

Ця величина є постійною для будь-якого ряду, що намотується.

Дефект другого роду. Приріст радіуса котушки за допомогою витка, при намотуванні якого стався дефект другого роду, обчислюється виходячи з виду на структуру укладання з торця волокон (рис. 4.6, а):

$$\Delta r_{д2} = 4R_B. \quad (4.11)$$

Радіус ряду волокна, що намотується на котушку, в цьому випадку дорівнюватиме:

$$R_N = R_{N-1} + \Delta r_{д2} = R_{N-1} + 4R_B \quad (4.12)$$

Приріст довжини волокна за допомогою витка, при намотуванні якого відбувся дефект другого роду, розраховується виходячи з виду на розгорнуту площину укладання волокон (рис. 4.6, б):

$$\Delta L_{д2}^2 = (2\pi R_N)^2 + R_B^2 \quad (4.13)$$

Враховуючи рівняння (4.11), отримуємо:

$$\Delta L_{д2} = \sqrt{4\pi^2 (R_{N-1} + 4R_B)^2 + R_B^2} \quad (4.14)$$

Для прийнятих вище значень R_k та R_b з урахуванням рівняння (4.12) для $N=3$ маємо $\Delta L = 632,23$ мм. В результаті наступних обчислень отримаємо $\Delta L_{д2} = 1,43$ мм.

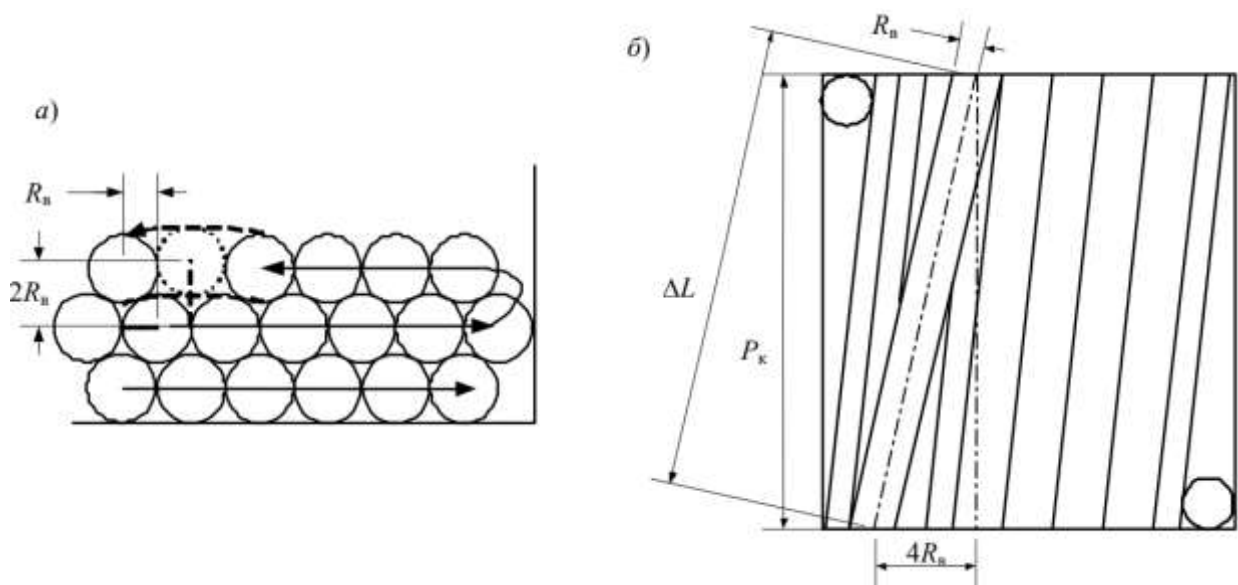


Рисунок 4.6 – Схема намотки оптичного волокна на катушку

4.2.3 Трансляція похибок на наступні ряди волокон

Намотування кожного наступного витка в тому самому ряду за наявності дефекту другого роду веде до прирощення довжини волокна (рис. 4.7, а). З урахуванням наближення $\Delta L_{д1} = 0,17$ мм.

Намотування ряду волокна поверх ряду, в якому відбувся дефект першого роду, веде до зменшення довжини волокна на $\Delta L_{д2}$ витка, покладеного в область зміщення між волокнами попереднього ряду (рис. 4.7, б).

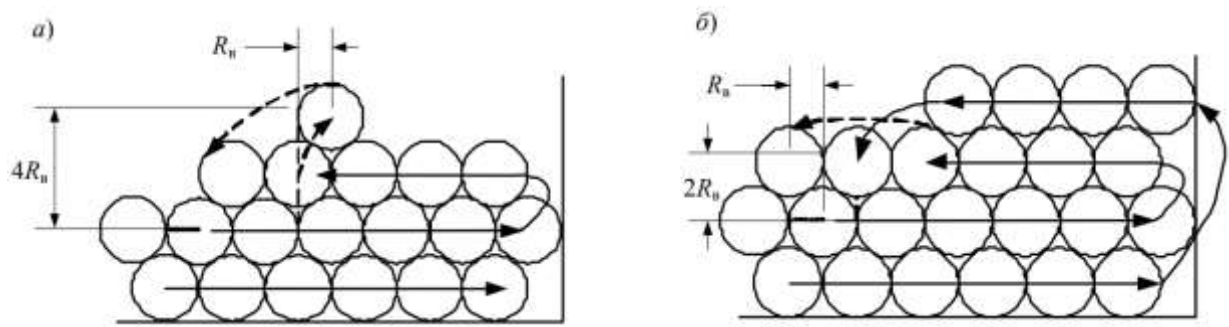


Рисунок 4.7 – Схема намотки оптичного волокна на катушку

Це вказує на те, що дефекти першого та другого роду мають різний характер походження, але вносять при цьому однакові нерівномірності в структуру квадрупольного намотування.

Слід зазначити, що процес намотування оптичного волокна супроводжується і більш складними дефектами: дефект нерегулярного зміщення волокна поверх n -го покладеного перед цим витка, дефект зміщення волокна через n витків в межах ряду, що укладається і т.д. Такі дефекти призводять до кратного збільшення довжини намотуваного волокна по порівнянню з дефектами першого і другого роду. Як наслідок, описані вище локальні порушення регулярності укладання витків слід визнати мінімальними розпізнаваними дефектами намотування оптичного волокна.

4.3 Крок укладання оптичного волокна на катушку

Довжина волокна, що становить волоконно-оптичний контур, залежить від діаметра катушки та волокна, ширини катушки, кроку укладання, дефектів укладання [34–35].

При намотуванні кожного нового шару відбувається збільшення сумарного діаметра волоконно-оптичного контуру. За відсутності дефектів будемо мати таке значення діаметра контуру:

$$D_{кон} = D_{\kappa} + (2 + (N - 1)\sqrt{3})D_B. \quad (4.15)$$

Як наслідок, довжина волокна кожного наступного шару буде прямо залежати від діаметра котушки та волокна. Значення цих параметрів не залежать від оператора, що робить намотування контуру, на відміну від кроку укладання, точна установка якого є дуже важливим завданням. При значенні кроку укладання, меншому за діаметр волокна на величину ΔD , через n витків, де $n = D_{\kappa} / \Delta D$, може статися дефект другого роду, що істотно порушить регулярність структури волоконно-оптичного контуру. Установка величини кроку укладання більшого, ніж діаметр волокна, призведе до значно менших порушень структури, проте в цьому випадку один шар контуру вміщуватиме менше число витків. Крім того, діаметр контуру буде дещо скорочений, внаслідок того, що витки кожного наступного шару потраплятимуть у проміжки між витками попереднього шару. Обидва фактори призведуть до зменшення довжини волокна у контурі [38].

Як наслідок, необхідно точно вимірювати діаметри перерізів оптичного волокна для збільшення довжини контуру в межах встановленої кількості квадруполів.

Висновок. У ході проведених досліджень було опрацьовано дані, отримані при намотуванні волоконних контурів, виявлено основні дефекти намотування, а також визначено вплив кроку укладання на параметри якості. Було встановлено, що дефекти намотування приводять, по-перше, до зміни довжини контуру (проте в силу свого випадкового характеру дана зміна відрізняється для лівого і правого плеча контуру), по-друге, до збільшення кількості локальних вигинів волокна і, як наслідок, збільшення розсіювання світла в хвилеводі [39–40]. Крім того, була визначена природа дефектів, яка безпосередньо пов'язана з особливостями волокна, обладнання та технології намотування. У ході проведених досліджень побудовано модель квадрупольного укладання оптичного волокна для трьох варіантів намотування. У рамках створеної моделі розраховані приращення довжини

волокна, що намотується, і похибки, викликані дефектами намотування. На основі отриманих даних можна побудувати систему спостереження за дефектами безпосередньо в процесі намотування за допомогою датчика, що реєструє довжину волокна, яка дозволить оцінити якість виготовленого чутливого елемента.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи було розроблено конструкторську документацію на виготовлення дослідного зразка волоконного гіроскопа. Описано основні технологічні, конструктивні особливості оптоволоконного гіроскопа. Описано основні алгоритми обробки оптичних сигналів модулем 3.

У ході проведених досліджень було опрацьовано дані, отримані при намотуванні волоконних контурів, виявлено основні дефекти намотування, а також визначено вплив кроку укладання на параметри якості. Було встановлено, що дефекти намотування приводять, по-перше, до зміни довжини контуру (проте в силу свого випадкового характеру дана зміна відрізняється для лівого і правого плеча контуру), по-друге, до збільшення кількості локальних вигинів волокна і, як наслідок, збільшення розсіювання світла в хвилеводі. Крім того, була визначена природа дефектів, яка безпосередньо пов'язана з особливостями волокна, обладнання та технології намотування. У ході проведених досліджень побудовано модель квадрупольного укладання оптичного волокна для трьох варіантів намотування. У рамках створеної моделі розраховані приращення довжини волокна, що намотується, і похибки, викликані дефектами намотування. На основі отриманих даних можна побудувати систему спостереження за дефектами безпосередньо в процесі намотування за допомогою датчика, що реєструє довжину волокна, яка дозволить оцінити якість виготовленого чутливого елемента.

У ході температурних випробувань було виявлено залежність температурного коефіцієнта показника заломлення оптичного волокна від його довжини в котушці. Ця залежність пов'язана з додатковими напруженнями, що виникають у середині оптичного волокна в контурі (на перших шарах намотування) внаслідок самої квадрупольної технології укладання оптичного волокна, і має враховуватися при аналізі впливу температурного фактору на

стан волоконно-оптичного контуру та зниженні чутливості вихідного сигналу ВОГ до змін температур.

Тому, можна зробити такі висновки.

1. Намотування оптичного волокна на катушку потрібно проводити на спеціалізованому станку, це призведе до покращення чутливості ВОГ.

2. Для зменшення габаритів пристрою до розмірів 120 мм потрібно:

– зменшити вихідні оптичні волокна кожного елемента з довжини 1 м до 50 см;

– для збільшення чутливості використовувати в конструкції модулятор фази та довжину волокна не менше 500 м.

Виконання умов перерахованих вище, дозволить зменшити габарити ВОГ та підвищити його чутливість, що буде зроблено в наступному етапі НТР з відповідним корегуванням конструкторської документації на виготовлення дослідного зразка гіроскопа.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Lefevre H. C. Fundamentals of the Interferometric Fiber-Optic Gyroscopes / H. C. Lefevre // Photonetics. 1996. Vol. 4. No. 1A. P. 20–27.
2. KVH. E•Core FOG – A New Spin On Fiber Optic Gyro // KVH. URL: <http://ftp.uni-duisburg.de/Hardware/KVH/e-coret.pdf> (дата звернення 10.11.2022).
3. KVH, KVH E-Core 2000 Fiber optic Gyro. Technical Manual // KVH. URL: <http://www.kvh.com> (дата звернення 25.10.2022).
4. KVH. KVH E-Core 3000 Fiber optic Gyro. Technical Manual // KVH. URL: <http://www.kvh.com> (дата звернення 25.10.2022).
5. KVH, KVH E-Core 5000 Fiber optic Gyro. Technical Manual // KVH. URL: <http://www.kvh.com> (дата звернення 27.10.2022).
6. Logan R. Optical integration improves fiberoptic gyroscopes // LaserFocusWorld: International Resource for Technology and Applications in the Global Photonics Industry. URL: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-41/issue-7/optoelectronics-manufacturing/optical-integration-improvesfiber-optic-gyroscopes.html> (дата звернення 28.09.2022).
7. Kolevatov A. P., Nikolaev S. G., Andreev A. G., Ermakov V. S., Dunaev D. A., Kel O. L., Malgin N. V. Development of a Dual Mode Attitude and Heading Reference System on Fiber Optic Gyros for Land Vehicles // 13th Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, 2006. P. 338—347.
8. Meshkovsky I. K., Strigalyov V. I., Deineka G. B., Peshekhonov V. G., Nosenyuk L. P. A three-axis fiber-optic gyroscope for marine navigation systems // 16th Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, 2009. P. 7—12.
9. Ward A.J. A program for calculating photonic band structures, Green's functions and transmission/reflection coefficients using a non-orthogonal FDTD method/ J. B. Pendry. Comput. Phys. Comm. 2000. № 128.P. 590–621.
10. Falco A. Di., O'Faolain L., Krauss T. F. Chemical sensing in slotted photonic crystal heterostructure cavities. Applied physics letters. 2009. Vol. 94.063503.

11. Peng Y., Hou J., Zhang Y., Huang Z., Xiao R., Lu Q. Temperature sensing using the bandgap-like effect in a selectively liquid-filled photonic crystal fiber. *Optics Letters*. 2013. № 38. P. 263–265.

12. Bernini R., Campopiano S., Zeni L., Sarro P.M. ARROW optical waveguides based sensors. *Sensors and Actuators*. 2004. Vol. 100. P.143–146.

13 Hu J., Tarasov V., Agarwal A. Fabrication and testing of planar chalcogenide waveguide integrated microfluidic sensor. *Optics Express*. 2007. Vol. 15. No. 5. P. 2307.

14. Гнатенко А. С., Мачехин Ю.П., Натарова Ю. В. Система управления диодами накачки волоконных кольцевых фемтосекундных лазеров. // *Прикладная радиоэлектроника*. 2015. Т. 14, № 2. С. 185 – 189.

15. Gnatenko A. S., Machechin Y. P. Generation mode stability of a fiber ring laser // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2015. Vol. 74, No 7. P. 641– 647.

16. Гнатенко А. С., Мачехин Ю. П., Курський Ю. С., Обозна В. П. Забезпечення синхронізації мод в волоконних кільцевих лазерах // *Журнал нано- та електронної фізики*. 2018. Т. №2. С. 02033-1 – 02033-8.

17. Гнатенко А. С., Мачехин Ю. П. Исследование стабильности волоконного кольцевого лазера для DWDM систем и обработки информации // *МРФ-2014*. Харьков: ХНУРЕ. октябрь 2014г. С. 105 – 107.

18 Пассивные SMD компоненты.

URL:<http://www.kosmodrom.com.ua/prodlist.php?page=0&name=%E8%E7%EE%EB%FF%F6%E8%EE%ED%ED%FB%E9> (дата звернення 10.11.2022).

19. (<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=VRC4> (дата звернення 10.11.2022)).

20 Соломатін В. Технічні умови на волоконний датчик обертання / *Фізоптика*. 2009. No3 20 с.

21. ОИУС-1000. Прецизійний вимірювач швидкості. ООО Научно-Производственная Компания "Оптолинк". URL <http://www.optolink.ru/ru-o-kompanii> (дата звернення 30.10.2022).

22. Peshekhonov V. G., Nesenyuk L. P., Staroseltsev L. P. Trends in Development of Miniature Strapdown Inertial Measurement Units in CSRI Elektropribor // Symp. Gyro Technology. Stuttgart, Germany, 2000. P. 13.

23. Paturel Y., Rumoroso V., Chapelon A., Honthaas J. MARINS, the First FOG Navigation System for Submarines // Symp. Gyro Technology. Stuttgart, Germany, 2006. P. 17.

24. Kolevatov A. P., Nikolaev S. G., Andreev A. G., Ermakov V. S., Dunaev D. A., Kel O. L., Malgin N. V. Development of a Dual Mode Attitude and Heading Reference System on Fiber Optic Gyros for Land Vehicles // 13th Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, 2006. P. 338–347.

25. Meshkovsky I. K., Strigalyov V. I., Deineka G. B., Peshekhonov V. G., Nesenyuk L. P. A three-axis fiber-optic gyroscope for marine navigation systems: 16th Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, 2009. P. 7–12.

26. Sharon J., Lin S. Development of an automated fiber optic winding machine for gyroscope production // Robotics and Computer Integrated Manufacturing. 2001.– № 17. P. 223–231.

27. Гнатенко А. С., Васько К. А., Алексеева Е. Д. Исследование дисперсии в волоконных лазерах с нелинейной эволюцией поляризации мод. Функциональная база наноэлектроники: VIII Международная научная конференция, г.Одесса, 01 октября 2015г. С. 146 – 148.

28. Gnatenko A. S., Aleksieieva K. D., Vasko K. A. The study polarization control using the lc cells inside the resonator of a fiber femtosecond laser. Electronics and Applied Physics: XI международная конференция, г.Киев, 23 октября 2015 г. С.24 – 25.

29. Гнатенко А. С., Ибадуллина А. М. Электронно-управляемые контроллеры поляризации для кольцевых волоконных лазеров. Фізика, електроніка, електротехніка: матеріали та програма науково-технічної 138 конференції, м. Суми, 18–22 квітня 2016 р. / Відп. за вип. С. І. Проценко. Суми: СумДУ, 2016. С. 42.

30. Gnatenko Alexander, Machekhin Yuri P. Stable fiber ring laser for DWDM systems and information processing // EWDTs-2014. Kyiv. P. 228 – 230.
31. Gnatenko A. S., Machekhin Yu. P., Muravsky A.A., Murauski A.A. Stable fiber ring laser for DWDM systems and information processing // WPC-2015. Munich. URL
32. Гнатенко А. С., Васько К. А., Алексеева Е. Д. Исследование дисперсии в волоконных лазерах с нелинейной эволюцией поляризации мод. Функциональная база нанoeлектроники: VIII Международная научная конференция, г.Одесса, 01 октября 2015г. С. 146 – 148.
33. Гнатенко А. С., Ибадуллина А. М. Развитие пассивной синхронизации мод в кольцевых волоконных лазерах. Матеріали 20 Міжнародного молодіжного форуму. Т. 1. Харків: ХНУРЕ, 2016. С. 178 – 179.
34. Кільцевий волоконний фемтосекундний лазер: пат. на винахід 111309 Україна / О. С. Гнатенко, Ю. П. Мачехін. ХНУРЕ. – опубл. 11.04.2016, Бюл. № 7. 5 с.
35. Гнатенко О. С. Синхронізація мод волоконного лазера за допомогою рідкокристалічних комірок: автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук : 01.04.01 "Фізика приладів, елементів і систем" / О. С. Гнатенко ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіoeлектроніки. – Харків, 2020. – 145 с
36. Гнатенко А.С., Алексеева Е.Д. Расчет дисперсионных характеристик оптических волокон для проектирования кольцевых резонаторов волоконных лазеров // Радиотехника. 2015. Вып. 182. С. 106 – 109.
37. Снайдер, А. Лав Д. Теория оптических волноводов. М.: Радиоисвязь, 1987. 326 с.
38. Stegeman G. I., Stolen R. H. Waveguides and fibers for nonlinear optics. Journal of the Optical
39. Мачехін Ю.П., Гнатенко О.С., Курський Ю.С., Семенець В.В., Неofітний М.В. «Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Частина 1. Лазерна інформаційно-вимірювальна техніка для задач військового призначення». Харків: ФОП Панов А.М., 2019. 156 с.

40. Гнатенко О.С., Мачехін Ю.П. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч.2. Параметри лазерного випромінювання. Харків: Факт, 2021. 145 с.