

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри електронної техніки

_____ Олександр ВОВНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2022 р.

Випускна кваліфікаційна робота

_____ бакалавра
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка електронного пристрою вимірювання температури
волоконно-оптичним сенсором»

Виконав студент 4 курсу, групи ЕЛТ-18
(шифр групи)

спеціальності _____ 171 Електроніка
(шифр і назва спеціальності)

_____ Чемеров Богдан Андрійович
(Прізвище, Ім'я та По-батькові) (підпис)

Керівник _____ доц. кафедри ЕТ, к.т.н., доц. _____ Олександр ШТЕПА
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ім'я) (підпис)

Рецензент _____ доцент кафедри АТ, к.т.н., доц. _____ Валерій ПОЦЕПАСВ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ім'я) (підпис)

Нормоконтроль
зав. кафедри ЕТ, д.т.н., проф.

*Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.*

_____ Олександр ВОВНА
(підпис)

Студент _____
(підпис)

Луцьк – 2022 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____
(дата)

з оцінкою _____

Секретар ЕК _____
(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра

Тема: «Розробка електронного пристрою вимірювання температури волоконно-оптичним сенсором»

Спецчастина: _____

Виконавець, студент

гр. ЕЛТ – 18

Богдан ЧЕМЕРОВ

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

Олександр ШТЕПА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

Олександр ВОВНА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Іван ЛАКТИОНОВ

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Олександр ШТЕПА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

**Державний вищий навчальний заклад
"Донецький національний технічний університет"**

Інститут, факультет Комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра Електронна техніка
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електронної техніки

Олександр ВОВНА

« 2022 року

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Чемеров Богдан Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка електронного пристрою вимірювання температури волоконно-оптичним сенсором

керівник проекту (роботи) Штепа Олександр Анатолійович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 06.05.2022 року № 180

2. Строк подання студентом проекту (роботи)

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

Технічна документація та матеріали з переддипломної практики

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз та характеристика об'єкту; обґрунтування та розробка структурної схеми електронного пристрою; розробка принципової схеми електронного пристрою; оцінка метрологічних характеристик; синтез мікропроцесорної частини електронного пристрою; розробка конструкції та зовнішнього вигляду електронного пристрою.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	доц. каф. ЕТ, к.т.н., доц. Штепа О.А.		
2.1	доц. каф. ЕТ, к.т.н., доц. Штепа О.А.		
2.2	зав. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Вовна О.В.		
2.3	проф. каф. ЕТ, д.т.н., доц. Лактіонов І.С.		
3	доц. каф. ЕТ, к.т.н., доц. Штепа О.А.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз способу та засобів дистанційного вимірювання температури		
2	Розробка структурної схеми електронного пристрою вимірювання температури		
3	Розробка вимірювального каналу температури електронного пристрою		
4	Додаток А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій на підприємстві		

Студент

_____ **Богдан ЧЕМЕРОВ**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ **Олександр ШТЕПА**
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

Посада, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ	Суть зауваження, оцінка та підпис

АНОТАЦІЯ

Чемеров, Б.А. Розробка електронного пристрою вимірювання температури волоконно-оптичним сенсором / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» зі спеціальності 171 Електроніка. – ДВНЗ «ДонНТУ», Луцьк, 2022.

Пояснювальна записка: 57 стор., 20 рис., 17 посилань.

Моделювання роботи способу виконано в пакеті прикладних програм OptiSystem. Під час моделювання одержано результати, які підтверджують можливість використання запропонованого способу для вимірювання температури та визначення спектральних характеристик вибіркової брегівської ґрати, що обумовлено зміною температури.

Під час оцінки показників точності вимірювання параметрів сигналу за двома складовими сигналу оптичного випромінювання запропоновано підходи, що базуються на теорії квазігармонічних коливань. Якщо має місце зміна центральної довжини хвилі на $(10 - 15)$ пм на кожний 1°C , то різниця ходу під час зміни температури на $\pm 50^{\circ}\text{C}$ складає 1 нм. Якщо поставити у відповідність цієї різниці ходу півширину в 1 нм вибіркової брегівської ґрати, то одержимо зміну різниці фаз $\pm \pi/2$. У відповідності до значення похибки результату вимірювання різниці фаз $\pm 3,14 \cdot 10^{-4}$ рад складає $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$. Величина абсолютної похибки вимірювання температури становить не більше $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Розроблено волоконно-оптичні сенсори температури, зі застосуванням яких можна виконувати вимірювання абсолютних значень температури з показниками точності, що визначено в технічних вимогах. Для досліджень волоконно-оптичних сенсорів розроблено установки з обліком конструктивних особливостей сенсорів, що дає змогу виконувати налаштування центральної довжини хвилі сигналів неузгодженості пасивних оптичних мереж.

Ключові слова: вимірювання, температура, сенсор, оптичне волокно, довжина хвилі, різниця фаз, мікроконтролер, похибка.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ СПОСОБУ ТА ЗАСОБІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.....	9
1.1 Вимірювання температури волоконно-оптичними сенсорами.....	9
1.2 Аналіз характеристик компонентів пасивних оптичних мереж.....	12
1.2.1 Хвильовий еталон.....	12
1.2.2 Впорядковані хвильові ґрати.....	14
1.2.3 Волоконні брегівські ґрати.....	17
1.3 Висновки.....	20
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ.....	21
2.1 Розробка структури електронного пристрою для визначення центральної частоти та температури.....	21
2.2 Моделювання електронного пристрою вимірювання температури.....	25
2.3 Аналіз складових похибок вимірювання температури.....	30
2.4 Висновки.....	36
3 РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ.....	38
3.1 Розробка стенду для вимірювання температури.....	38
3.2 Широкосмуговий пристрій обробки оптичного сигналу.....	41
3.3 Вузькосмуговий пристрій обробки оптичного сигналу.....	44
3.4 Висновки.....	46
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49
ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій на підприємстві.....	51

ВСТУП

Провідні спеціалізовані компанії світу розробляють систем моніторингу для волоконно-оптичних ліній зв'язку такі, як пасивні оптичні мережі, які призначено для розв'язання різних завдань.

Ці розробки використовуються для моніторингу пасивних оптичних мереж на базі, які засновано на способі оптичної рефлектометрії в часовій області, а також його спеціальних різновидів.

Проте зазначені способи є важкі під час практичної реалізації чи доволі недешеві, також вони є унікальним та призначено для одиничних завдань. За допомогою цих способів можна отримати інформацію щодо зміни температури про стан селективних елементів пасивних оптичних мереж.

Зазначені особливості сприяють розвитку сталого підходу до селективних елементів пасивних оптичних мереж, як деякого типу внутрішньозонової чи магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку. У сучасних умовах розвитку волоконно-оптичних мереж, які мають доволі велику кількість розгалужень та мультиплексування на першому етапі виникає завдання до розробки вимірювальних систем, які вирішують завдання декомпозиції структурування мережі (рівнів і каналів), а потім здійснення вимірювання спектральних характеристик і параметрів кожного з оптичних каналів, що дозволяє здійснювати дистанційне вимірювання зміни температури вимірювального середовища.

Більшого прогресу під час розв'язання задачі декомпозиції досягнуто з маркування каналів за допомогою волоконних брегівських ґрат, що мають унікальну довжину хвилі відображення. Застосування цих брегівських ґрат виправдовується за таких причин:

- застосування структурованих і стандартних брегівських ґрат дозволяє здійснювати маркування каналів і груп пасивних оптичних мереж;
- застосування брегівської ґрати як волоконно-оптичного сенсора,

дозволяє отримати інформацію щодо зміни температури про стан інших селективних елементів, що дозволяє здійснювати моніторинг кліматичних умов, що визначає їх спектральні характеристики;

– використання брегівських ґрат дозволяє забезпечити вимоги спектрального поділу каналів моніторингу кліматичних параметрів.

Під час застосування спектральних способів моніторингу пасивних оптичних мереж та здійснення вимірювання температури у вузлах необхідно застосовувати способів рефлектометрії в частотній області. Якщо використовувати потужні короткі імпульси для здійснення зондування оптичного волокна, то мають місце нелінійні ефекти, наявність яких позначається на якості обслуговування тому, що їх застосуванням зачіпає спектральну область передачі інформаційних сигналів щодо зміни температури.

У теперішній час розвитку технології виникає можливість застосування недорогих одночастотних лазерів, модулятори типу Маха-Цендера, а також комбінаційних генераторів. На основі зазначених пристроїв виникає можливість реалізації способів полігармонійного зондування для здійснення моніторингу температури.

Зазначені обставини визначають актуальність випускної кваліфікаційної роботи бакалавра з розробки засобів двочастотного симетричного зондування селективних компонентів пасивних оптичних мереж для забезпечення вимірювального контролю температури.

1 АНАЛІЗ СПОСОБУ ТА ЗАСОБІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

1.1 Вимірювання температури волоконно-оптичними сенсорами

Реалізацію способу вимірювання температури зі застосуванням широкосмугового джерела оптичного випромінювання наведено на рис. 1.1.

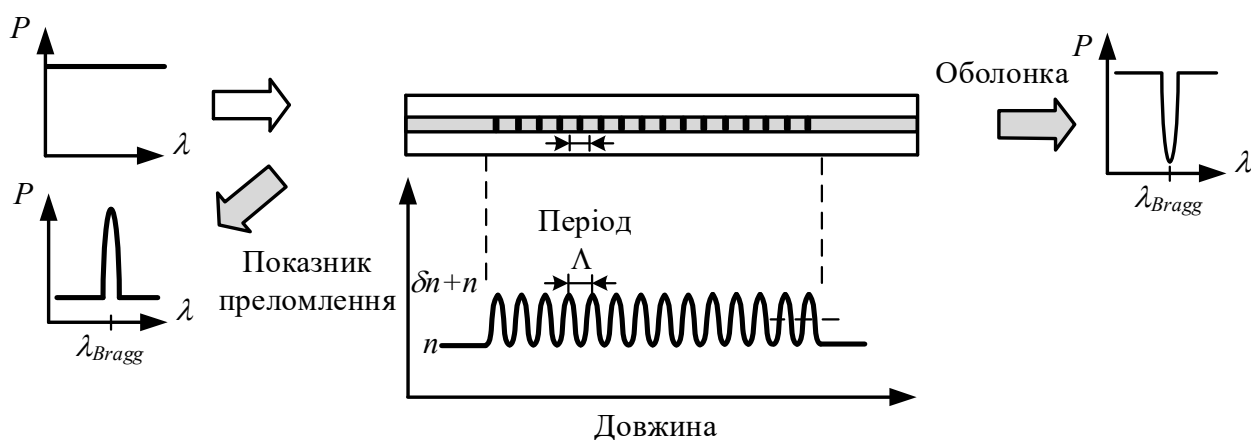


Рисунок 1.1 – Реалізація способу вимірювання температури зі застосуванням широкосмугового джерела оптичного випромінювання

Значення резонансної довжини хвилі вибіркової брегівської ґрати $\Delta\lambda_{\text{БРБ}}$ залежить від зміни температури оптичного волокна, а також від прикладеного механічного напруження під час розтягування та стиснення, що описується таким рівнянням [1]:

$$\Delta\lambda_{\text{БРБ}} = 2 \cdot \lambda_{\text{ЕФ}} \Lambda \times \left(\left\{ 1 - \left(\frac{\xi^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \varepsilon + \left[\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right] \Delta T \right),$$

де ε – напруження, що прикладено оптичного волокна;

ΔT – зміна температури;

другий доданок, який заключено до фігурних дужок показує величину коефіцієнту фотопружності.

Зазначена залежність має два типових значення зсуву довжини хвилі, що залежить від зміни температури $\sim 0,01$ нм/К, а також відносного збільшення оптичного волокна $\sim 10^3 (\Delta L/L)$ (нм). Під час зміни значення температури змінюється величини довжини хвилі брегівської грати.

До основного недоліку волоконно-оптичних сенсорів цього типу можна віднести наявність мультиплікативного відгуку брегівської грати на зміну температури та механічної напруженості. Проте створено та розроблено доволі велику кількість способів зменшення цього впливу [2, 3].

У теперішній час розроблено способи та засоби вимірювання зміни різних фізичних параметрів, у тому числі температури зі застосуванням волоконно-оптичних сенсорів на базі вибіркової брегівської грати [2, 4, 5]. Зазначені способи є вузькосмуговими, вони у порівнянні зі широкосмуговими (див. рис. 1.1) базуються на застосуванні двох та більше гармонічних складових лазерного оптичного випромінювання.

Використання вузькосмугового переналаштування полігармонічного оптичного випромінювання або застосування пристроїв без переналаштування дозволяє отримати необхідну точність вимірювань з розширеним діапазоном зміни параметрів, які визначаються. Застосування цих заходів дозволяє зменшити вартість оптико-електронного вимірювального пристрою. Виконаємо аналіз зазначених технологій щодо техніко-економічних та метрологічних характеристик, а також виконаємо оцінку можливості їх використання під час моніторингу зміни температури пристроїв пасивних оптичних мереж.

Під час аналізу виявлено, що розробка пасивних оптичних мереж з покращеними техніко-економічними та метрологічними характеристиками має складності через обмежені можливості, а також є доволі складними в реалізації з високою вартістю. Вказаний висновок є наслідком декількох взаємопов'язаних факторів.

Перша фактор базується на використанні спектральних способів

вимірювального контролю, складністю та великою вартістю оптичних аналізаторів для реалізації [5].

Другий фактор обумовлений визначенням деякої кількості гармонійних складових, які застосовуються для зондування, а також необхідністю переналаштування частот цих гармонійних складових, що обумовлено збільшенням кількості дорогих модуляторів під час реалізації пристрою.

Як третій фактор – це здійснення амплітудного або фазового вимірювання. Фазове вимірювання має кращі показники за точністю. Аналіз за величиною різницевої частоти може надати можливість уникання прийому інформації в широкосмуговому діапазоні, що знижує вартість оптико-електронного пристрою, що розробляється.

Серед зазначених способів необхідно більше уваги приділити двох частотному симетричному способі вимірювання на базі вибірових брегівських ґрат з обробкою за огинаючою. Цей спосіб має можливість здійснювати амплітудно-фазову та фазову реєстрацію. Реалізація зазначеного способу має високу швидкодію, забезпечує вимірювання температури в межах $\pm 100^\circ\text{C}$ з величиною абсолютної похибки вимірювання не більше $\pm 0,1^\circ\text{C}$ та напружень в межах зміни до 10^{-1} з похибкою вимірювання до одиниць ϵ_μ .

Вимірювання зміни температури зі застосуванням сенсорів на базі брегівської ґрати базується до визначення величини зсуву центральної довжини решітки хвилі. У випускній кваліфікаційній роботі для зондування характеристик і параметрів брегівської ґрати застосовується двохчастотне оптичне випромінювання, що мають амплітуди $R_1=R_2$ та протилежні за фазою $\varphi_{R1} = -\varphi_{R2}$ [6], що відрізняються високою стабільністю та спектральною чистотою під час зміни параметрів формування. Також у зазначеній реалізації пристрій є можливість перебудови різницевої частоти для застосування з різними характеристиками брегівської ґрати.

Зазначені характеристики повністю задовольняють вимоги для побудови джерел оптичного випромінювання для волоконно-оптичних сенсорних мереж. Як методику вимірювання вибрано інтегральний аналіз характеристик

двохчастотного оптичного випромінювання, що пройшло через брегівську ґрату або віддзеркалено від неї. Під час зсуву контуру брегівської ґрати має місце нерівність $R_2 \neq R_1$ та зміна фазових співвідношень між двохчастотними складовими випромінювання.

Зазначені способи застосовуються зазвичай для роботи з одиничними оптичними сенсорами або групами сенсорів, які складаються з трьох-п'яти брегівських ґрат під час здійснення вимірювання температури. Для оцінки спектральних характеристик брегівських ґрат є практично не вивченим. Отже, потрібно виконати оцінку можливості використання способів, що розглянуто в цьому розділі для дослідження характеристик і параметрів пристроїв пасивних оптичних мереж.

1.2 Аналіз характеристик компонентів пасивних оптичних мереж

1.2.1 Хвильовий еталон

Типова конфігурація (див. рис. 1.2) має в своєму складі блок хвильової синхронізації, який складається з двох фотодіодів. Один фотодіод є опорним, на нього надходить оптичне випромінювання від лазера через систему дзеркал. Другий фотодіод є вимірювальний, до якого оптичне випромінювання передається через хвильовий еталон [7].

Як хвильовий еталон застосовується інтерферометр Фабрі-Перо, який функціонує в усіх діапазонах S, C і L довжин хвиль з FSR, значення дорівнює 25, 50 або 100 ГГц (див. рис. 1.3). У TWDM-PON застосовується сітка частот 100 ГГц.

Хвильовий еталон є пасивним компонентом, коефіцієнт його пропускання визначається зі застосуванням функції Ейрі.

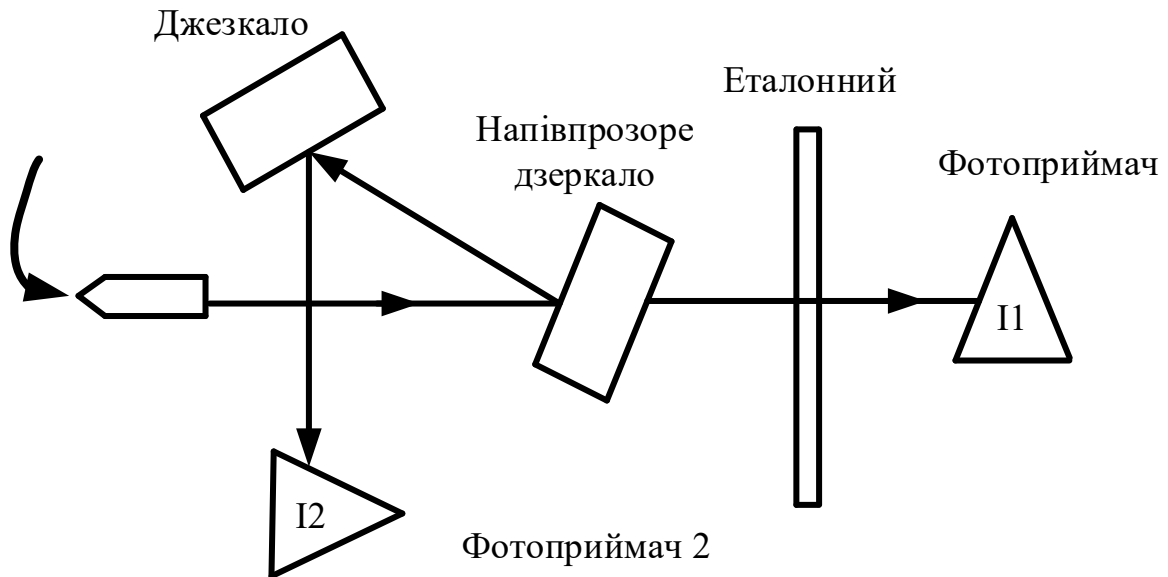


Рисунок 1.2 – Схема структурна блоку хвильової синхронізації

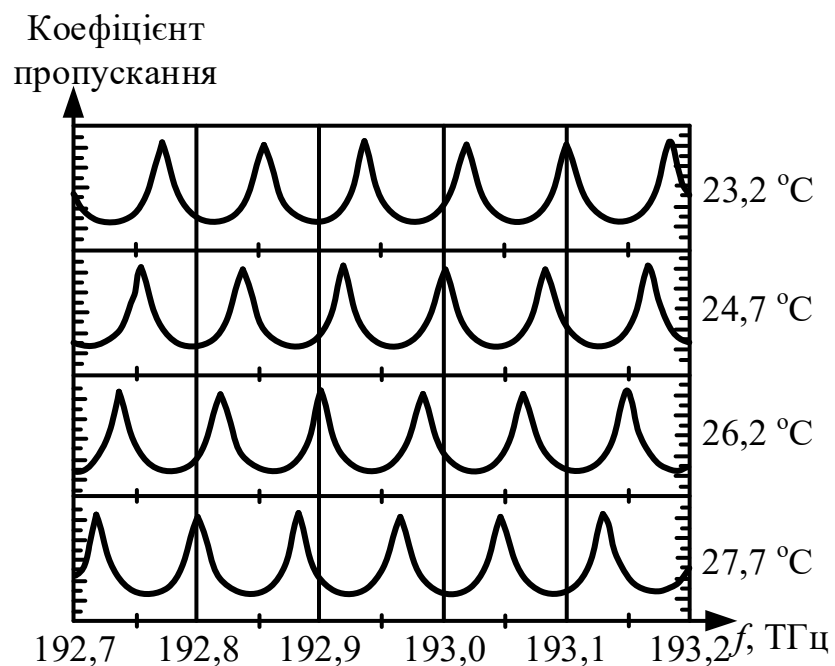


Рисунок 1.3 – Характеристики еталона від зміни температури

Налаштування блоку здійснюється таким чином, щоб під час збігу амплітуд вихідних сигналів фотодіодів з довжиною хвилі оптичного випромінювання від лазера, що відповідає 100 ГГц у сітці, величина абсолютної похибки була не більше ніж ± 1 ГГц. Під час відхилення значення обох амплітуд має місце флуктуація потужності лазерного випромінювання. Під час відхиленні одного зі зазначених сигналів, вважається, що має місце зміна

частоти оптичного випромінювання лазера або зміна характеристики хвильового еталона, що обумовлено зміною температури.

Для усунення зазначеного ефекту та потрібно виконувати синхронізацію за температурою та спектральними характеристиками блоку. Описану систему можна застосовувати для здійснення вимірювального контролю довжини хвиль оптичного лазерного випромінювання. Типове значення зсуву центральної частоти для хвильового еталона змінюється в межах від 1 до 10 ГГц/°C. Для забезпечення значення похибки налаштування для центральної довжини хвилі оптичного випромінювання в діапазоні ± 1 ГГц необхідно здійснювати вимірювання температури з величиною абсолютної похибки не більше $\pm 0,67$ °C. Цього значення можна досягнути під час вимірювання температури еталона зі застосуванням брегівської ґрати. Проте також необхідно здійснювати вимірювання температури за одним з каналів хвильового еталона, що обумовлено вимогами універсальності оптико-електронного пристрою.

1.2.2 Впорядковані хвильові ґрати

Впорядковані хвильові ґрати [8] застосовують в пристроях без забезпечення електричним живленням, що не дає можливості здійснювати вимірювання температури. Отже, необхідно застосувати окремий канал для здійснення вимірювання й передачі інформації щодо зміни температури впорядкованої хвильової ґрати.

Поділ довжин хвиль у потоках, що виходять та заходять, забезпечується зі застосуванням впорядкованої хвильової ґрати (див. рис.1.4). Робочий діапазон температур складає: від -20 до $+55$ °C для комерційного виконання; від -40 до $+85$ °C для промислового та від -55 до $+125$ °C для військового варіанту.

У складі впорядкованої хвильової ґрати застосовується мікроконтролер, що здійснює вимірювання температури від зовнішнього сенсора датчика. Отже,

сенсором температури може бути волоконно-оптичний сенсор на базі впорядкованої хвильової ґрати.

Також потрібно розглянути варіант вимірювання температури за одним з каналів хвильового еталона, це обумовлено вимогами щодо універсальності пристрою моніторингу.

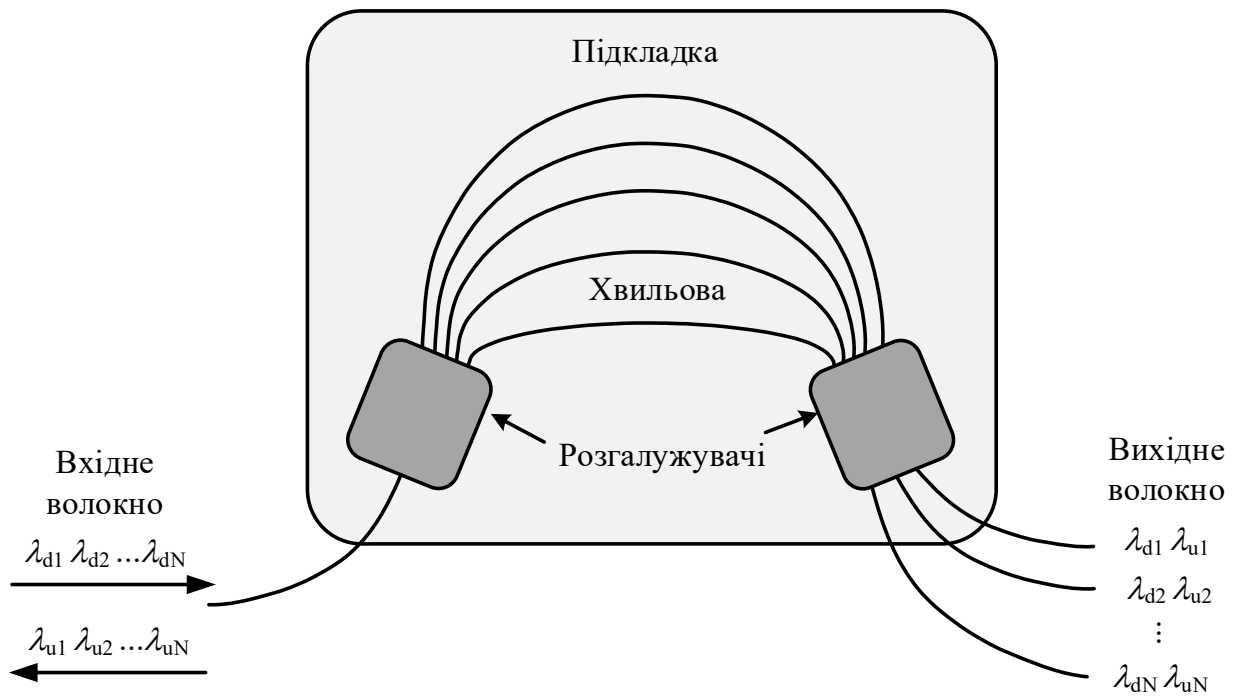


Рисунок 1.4 – Структура впорядкованої хвильової ґрати

Спектральну характеристику сітки типу ITU-T [9], що застосовується в структурі впорядкованої хвильової ґрати, наведено на рис. 1.5.

Для діапазону частот має місце аналітичний зв'язок для FSR між окремими каналами впорядкованої хвильової ґрати:

$$\frac{grid(n)}{grid(n+1)} = \frac{f_0}{f_0 + FSR},$$

де f_0 – значення центральної частоти каналу;

FSR – у цьому діапазоні частот значення дорівнює 100 ГГц.

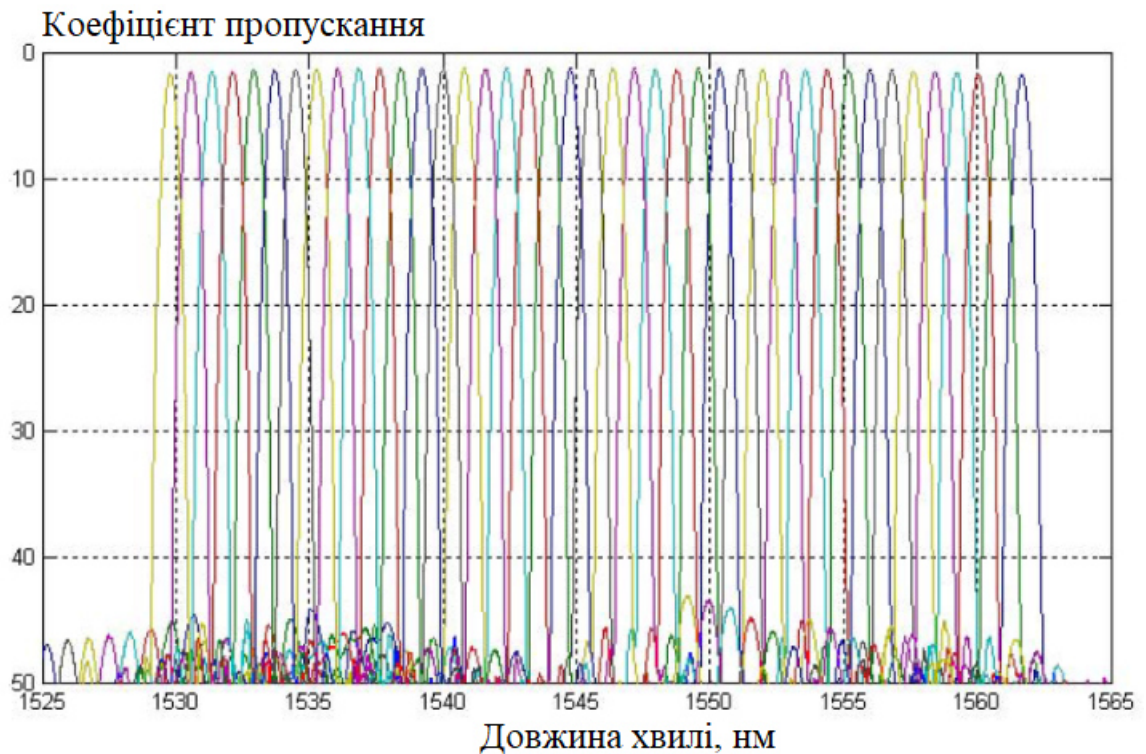


Рисунок 1.5 – Спектральна характеристика впорядкованої хвильової ґрати

Спектральну характеристику одного каналу впорядкованої хвильової ґрати можна визначити за допомогою функції Гауса, а залежність зміни її центральної частоти від температури буде дорівнювати:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial T} = \frac{\lambda}{n_c} \frac{\partial n_c}{\partial T} + \alpha_s,$$

де α_s – коефіцієнт, який показує розтягування або стиснення волокна під час нагрівання або стиснення;

n_c – показник заломлення.

Перша складова описує зміну показника заломлення. Наведене співвідношення дає типові значення під час зміни показника заломлення $8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ та коефіцієнта збільшення або зменшення оптичного волокна $\pm 3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Під час дії таких значень зсув центральної частоти впорядкованої хвильової ґрати дорівнює $11 \text{ пм/}^\circ\text{C}$. Якщо необхідно здійснювати вимірювання

частоти з абсолютним значенням похибки вимірювання ± 1 ГГц, то величина температури повинна визначатися з абсолютною похибкою не більше $\pm 0,67^\circ\text{C}$.

1.2.3 Волоконні брегівські ґрати

Волоконні брегівські ґрати забезпечують зв'язок між основною модою світловода та модою, яка розповсюджується у протилежному напрямку. Отже, на певній довжині хвилі оптичного випромінювання, що розповсюджується за світловоду, випромінювання віддзеркалюється від ґрат часткового або [1]. Властивості цього віддзеркалення визначаються параметрами ґрати. Для однорідної ґрати, яка має довжину L , значення коефіцієнту віддзеркалення R на резонансній довжині хвилі λ_{BG} можна визначити з виразу:

$$R = \text{th}^2(kL),$$

де $k = \frac{\pi \cdot \Delta n_{\text{mod}} \cdot \eta_{\text{BG}}}{\lambda_{\text{BG}}}$ – коефіцієнт зв'язку;

η_{BG} – частина оптичної потужності основної моди, що розповсюджується за серцевиною світловода;

Δn_{mod} – амплітуда однотональної модуляції показника переломлення n ;

Ширину спектру під час резонансу для однорідної ґрати за піввисотою (FWHM) можна розрахувати за таким співвідношенням:

$$\Delta \lambda_{\text{FWHM}}^{\text{BG}} \approx 2 \lambda_{\text{BG}} \gamma \sqrt{\left(\frac{\eta_{\text{BG}} \cdot \Delta n_{\text{mod}}}{2 \cdot n_{\text{eff}}} \right)^2 + \left(\frac{\Lambda}{L} \right)^2},$$

де γ – параметр, значення якого складає приблизно дорівнює одиниці для глибоких ґрат (значення коефіцієнта відображення $R \sim 1$) та близько 0,5 для

грат, які мають невелику глибину.

Огинаючи спектра вибіркової брегівської грати, що описується гаусівським контуром за віддзеркаленням R , можна виразити через розлад δ у вигляді [3]:

$$R = \frac{\sinh^2 \left[\kappa \cdot L \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{\kappa} \right)^2} \right]}{\cosh^2 \left[\kappa \cdot L \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{\kappa} \right)^2} \right] - \left(\frac{\delta}{\kappa} \right)^2},$$

де κ – коефіцієнт зв'язку мод;

$\frac{\delta}{\kappa}$ – відносне значення розладу;

L – довжина вибіркової брегівської грати;

Розлад вибіркової брегівської грати, яка має період Λ , дорівнює:

$$\delta = \Omega - \frac{\pi}{\Lambda}; \quad \Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{еф}}}{\lambda}.$$

Значення реально досяжної півширини резонансного діапазону волоконно-оптичного сенсору складає 0,025 нм [10], а вибіркової брегівської грати – 0,5 нм. Отже, здатність сенсора в 20 разів більше, ніж на одній вибірково брегівській граті. Тому для розробки та створення волоконно-оптичних сенсорів на базі вибірових брегівських грат з фазовим зсувом π рад необхідно застосовувати довжину резонатора, яка не більше ніж λ_{BG} . Величина напівширини резонансного піку цього типу грат може дорівнювати 0,005 нм. Завдяки цьому можна підвищити роздільну здатність вимірювань на два порядки, якщо порівнювати з волоконно-оптичними сенсорами на одній вибіркової брегівській граті.

Для вікна прозорості вибіркова брегівська грата зсув фаз буде дорівнювати $\Delta\varphi = \pi$ [11]:

$$T(\lambda) = \frac{\gamma^4}{\Delta\beta^2 \cdot (\Delta\beta^2 \cdot \cosh^2(\gamma \cdot L) + \gamma^2 \cdot \sinh^2(\gamma \cdot L) - 2 \cdot \kappa^2 \cdot \cosh^2(\gamma \cdot L) + \kappa^4)}.$$

Спектральні характеристики вибіркової брегівської ґрати та ґрати з фазовим зсувом наведено на рис. 1.6. Під час цього значення температури ґрат повинно підтримуватись у тому самому діапазоні $\pm 0,67^\circ\text{C}$.

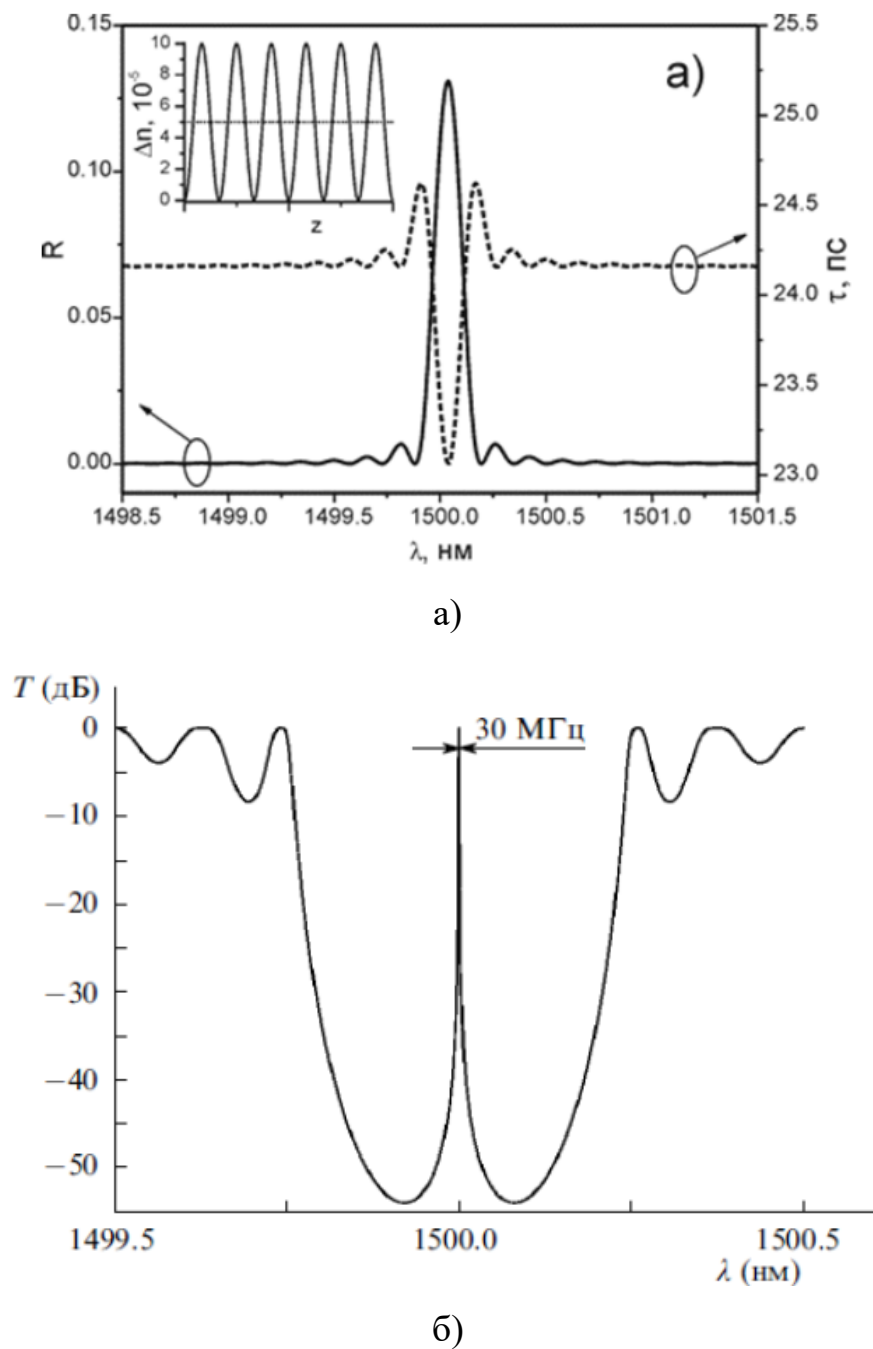


Рисунок 1.6 – Спектральні характеристики класичної вибіркової брегівської ґрати (а) та ґрати з фазовим зсувом π (б)

1.3 Висновки

Виконано аналіз існуючих способів і засобів вимірювання зміни зовнішніх параметрів: температура та напруження. Ці параметри визначають спектральні характеристики селективних компонентів пасивних оптичних мереж зі застосуванням волоконно-оптичних сенсорів.

Під час аналізу встановлено, що перспективними способами є способи, які базуються на використанні як чутливого елемента сенсора вибіркової брегівської ґрати зі застосуванням двохчастотного симетричного зондування зі визначенням впливу на базі інтегрального аналізу за фазою або огинаючого відбитого, або зондуючого оптичного випромінювання.

Ретельний аналіз можливих варіантів побудови сенсорів на базі вибіркової брегівської ґрати показав, що перспективною є застосування ґрат зі структурованим фазовим зсувом. Ці ґрати мають один або кілька широкосмугових і вузькосмугових вікон прозорості, що мають чергування. Під час зондування перших можна істотно підвищити роздільну здатність вимірювань зі збереженням базових закономірностей передачі вимірювальної інформації.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

2.1 Розробка структури електронного пристрою для визначення центральної частоти та температури

Структуру пристрою визначення значення центральної частоти грати та вимірювання температури наведено на рис. 2.1. Пристрій складається з послідовно з'єднаних двохчастотних лазерних оптичних випромінювачів, оптичного розгалужувача, першого та другого волоконно-оптичного кабелів, вибіркової брегівської грати, першого та другого фотоприймача, які підключено через третій волоконно-оптичний кабель з другим виходом оптичного розгалужувача, а також мікроконтролера з функцією вимірювача температури.

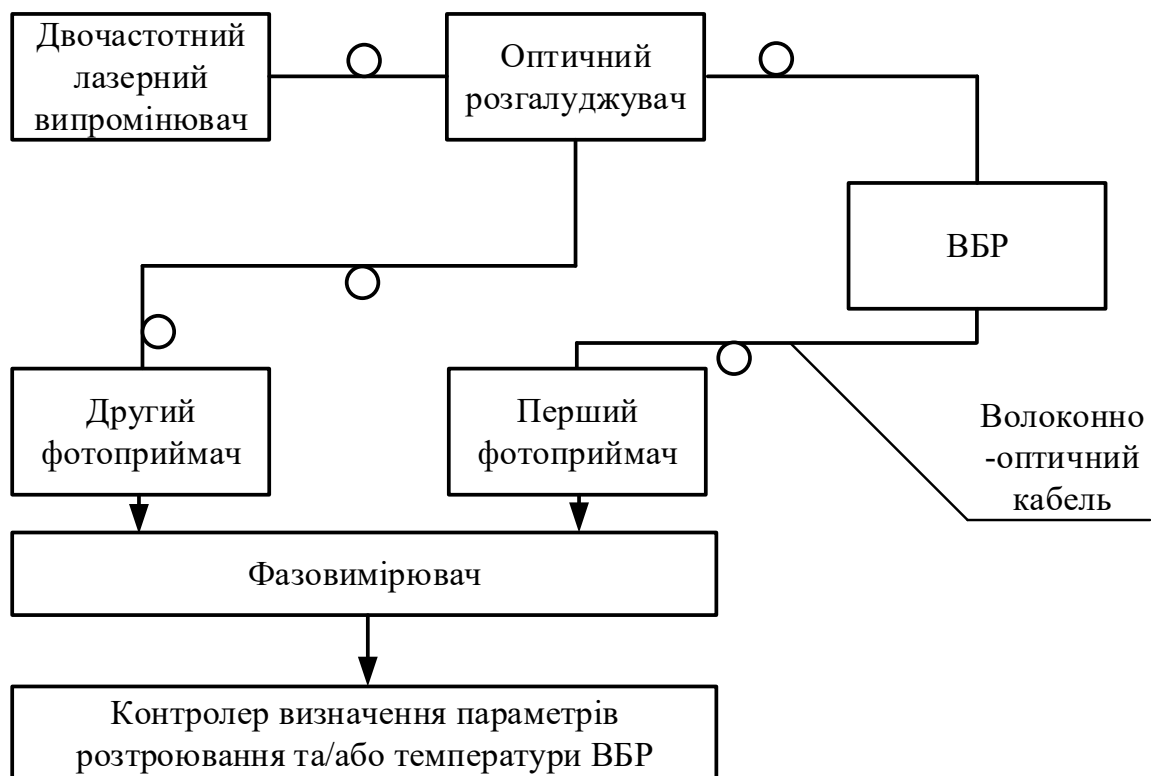


Рисунок 2.1 – Структура пристрою визначення значення центральної частоти грати та вимірювання температури

До складу пристрою введено фазометр, виходи першого та другого фотоприймальних пристроїв підключено до першого та другого входів фазометра. Вихід фазометра підключено до входу мікроконтролера, що здійснює вимірювання розладу резонансної частоти та температури.

Електронний пристрій можна виконано так, щоб довжина третього волоконно-оптичного кабелю дорівнювала довжині першого плюс другого кабелів.

Розглянемо реалізацію способу та роботу електронного пристрою під час його реалізації.

Для визначення значення центральної частоти вибіркової брегівської грати та вимірювання температури зі застосуванням двохчастотного лазерного оптичного випромінювача формується два сигнали, амплітуди яких практично дорівнюють між собою, а значення середньої частоти відповідає смузі частот пропускання вибіркової брегівської грати. Під час здійснення калібрування значень температури, а також різницевої частотою, ця смуга частот повинна бути доволі вузькою, для того щоб ці два зазначених сигнали потрапляли до смуги пропускання грати. Після цього здійснюється передача цих двох сигналів до вибіркової брегівської грати через оптичний розгалужувач за першим волоконно-оптичним кабелем.

У сформованих сигналах, які проходять через вибірккову брегівську грату, має місце зміна амплітуд складових сигналу, що залежить як від напрямку, так і від величини частотного зсуву його смуги пропускання, що обумовлено відстроюванням лазера або зміною температури та однозначно визначається через зазначені параметри.

Потім зі застосуванням першого фотоприймача забезпечується приймання двох сигналів, що пройшли через оптичний сенсор, який передає від нього за другому волоконно-оптичним кабелем.

Зі застосуванням другого фотоприймача здійснюється приймання вихідних сформованих двох сигналів, які передаються до його входу через другий вихід оптичного розгалужувача, а також третій волоконно-оптичний

кабель. На виході фотоприймачів мають місце сигнали, які відповідають огинаючої складових пар, що сформовано двохчастотним лазерним оптичним випромінювачем, а також огинаюча складових пар, що пройшла через вибірккову брегівську ґрату. Вимірювання різниці фаз між огинаючою двох сигналів пари, що пройшли через вибірккову брегівську ґрату, та огинаючу складових сигналів, що сформовано двохчастотним лазерним оптичним випромінювачем, здійснюється фазометром.

За одержаними вимірювальними значеннями, а також параметрами, що закладено в пам'яті мікроконтролера, визначається величина температури за допомогою залежності різниці фаз між огинаючою складових двох сигналів, що сформовані двохчастотним лазерним оптичним випромінювачем, а також огинаючою складових двох пар, які пройшла через вибірккову брегівську ґрату. Це значення залежить від розладу смуги пропускання та напрямку зсуву цієї смуги пропускання, що визначається в залежності від центральної частоти або під час калібрування температури. Зазначена залежність однозначно визначає центральну частоту вибіркової брегівської ґрати та температуру. Для виключення неоднозначності застосовується опорна сітка або інформація щодо зміни частоти оптичного випромінювання лазером.

Результат вимірювання є визначення різниці фаз між огинаючими складових сформованого та того, що пройшли через вибірккову брегівську ґрату зі застосуванням двохчастотного симетричного оптичного випромінювання. Результати вимірювання залежать від узагальненого розладу смуги пропускання вибіркової брегівської ґрати та температури, якщо до електронного пристрою подане двохчастотне симетричне оптичне випромінювання, яке має в своєму складі гармоніки з однаковою частотою смуги пропускання під час заданого значення температури, що отримано з калібрувальних величин, та різницевою частотою, величина якої дорівнює півширині смуги пропускання вибіркової брегівської ґрати.

Середній узагальнений розлад смуги пропускання вибіркової брегівської ґрати дорівнює нулю та відповідає його центральній й середній частотам

сформованої двохчастотної лазерним випромінювачем двох сигналів під час здійснення калібрування температури. Розлад між сформованими двома сигналами дорівнює двом та відповідає величині півширині смуги пропускання вибіркової брегівської ґрати. Під час дії інших значень розладу між складовими сформованих двох сигналів змінюють значення різниці фаз огинаючої, проте не змінюється характер залежності.

Під час дії заданого параметру температури, що отримано з результатів калібрування, середня частота сформованих двох сигналів буде відповідати нульовому значенню розладу. Складові двох сигналів будуть мати один з розладом -1 , а інший $+1$. Амплітуди цих складових будуть дорівнювати між собою, а різниця фаз огинаючої між сформованим сигналом та тим, що пройшов через вибірку брегівську ґрату дорівнюватиме нулю. Під час частотного зсуву смуги пропускання вибіркової брегівської ґрати залежно зміни температури положення складових сформованих двох сигналів щодо смуги пропускання може змінитися, а також має місце зміна різниці фаз огинаючої між складовими сформованого сигналу та того, що пройшов через вибірку брегівську ґрату відповідно до залежності перетворення.

Якщо відома залежність величини розладу смуги пропускання волоконно-оптичного сенсора від величина температури, то визначаються значення градієнту цього параметру. Для волоконно-оптичних брегівських ґрат значення розладу залежить від зміни температури $\sim 0,01$ нм/К, а відносне подовження світловолоконного проводу дорівнює $\sim 10^3 \Delta L/L$, нм [1].

Отже, зі застосуванням інформаційної складової вихідного сигналу фазометру щодо різниці фаз між огинаючою складових двох сигналів, що сформовано двохчастотним лазерним оптичним випромінювачем, а огинаюча складових двох сигналів, що пройшли через вибірку брегівську ґрату, розраховуються в мікроконтролері за узагальненим розладом смуги пропускання вибіркової брегівської ґрати та параметр розладу. За залежністю узагальненого розладу лінії пропускання вибіркової брегівської ґрати від зміни температури розраховується значення вимірювальної температури.

Електронний пристрій реалізується зі застосуванням різних типів селективних елементів, тип яких визначається залежно від задач та характеристики вимірювальних параметрів та їх градієнтів. Як селективні елементи можуть бути використано брегівські ґрати, інтерферометр Фабрі-Перо, впорядковані хвильові ґрати, тонкоплівковий фільтр.

Для реалізації описаного способу необхідно здійснювати вимірювання фазових співвідношень, а також вирівнювання фазових затримок під час розповсюдження двох сигналів за волоконно-оптичними кабелями можна досягти застосування в складі електронного пристрою третього волоконно-оптичного кабелю. Довжина цього кабелю повинна дорівнювати довжині першого плюс другого волоконно-оптичних кабелів.

2.2 Моделювання електронного пристрою вимірювання температури

Моделювання електронного пристрою вимірювання температури здійснюється в середовищі проектування OptiSystem 12.0 (trial version). Розглянемо схему моделювання та проаналізуємо його результати. Структурну схему електронного пристрою для двохчастотного моніторингу температури в OptiSystem наведено на рис. 2.2.

На першому етапі здійснюється генерування формування двохчастотного сигналу, що здійснюється зі застосуванням модулятора Маха-Цендера [12]. Формування двохчастотного сигналу здійснюється з точною рівністю робочої точки «нулю» характеристики модуляції. Під час збільшення напруги усунення робоча точка зміщується з робочої області, що може призвести до змінення режиму генерації сигналів. Сигнал від джерела, що має вузьку смугу лазерного випромінювання (CW лазер, який має потужністю 5 дБм) передається до модулятора. Для здійснення модуляції випромінювання від генератора сигналів (Sine Generator) до модулятора передається модулюючий сигнал оптичного випромінювання. Значення частоти генератора сигналів дорівнює 30 ГГц.

Величина рознесення складає 60 МГц, що відповідає значенню ширини вибіркової брегівської грати – 0,5 нм. Величина потужності кожної зі складових двохчастотного сигналу зондування дорівнює 35 мкВт (див. рис. 2.3).

На другому етапі моделювання здійснюється зондування вибіркової брегівської грати цим двох частотним сигналом (див. рис. 2.4). Для здійснення детектування сигналу використано лавинний фотодіод (APD photodetector), у якого чутливість за струмом становить 3 А/Вт, а значення темнового струму 10 нА.

Амплітудне значення потужності першої складової, що потрапила практично до центру вибіркової брегівської грати, становить 40 мкВт. Амплітудне значення потужності другої складової, що потрапила до правого схилу контуру, становить 30 мкВт. Цей випадок наводиться для окремого прикладу здійснення налаштування лазерного випромінювача не до центру вибіркової брегівської грати.

Залежність зміни різниці фаз від температури, що отримано під час моделювання наведено на рис. 2.5. Лінійність характеристики перетворення становить 0,998, а величина градієнту 0,011 нм/°С.

Реалізація способу сенсора температури та розладу центральної довжини хвилі вибіркової брегівської грати у вигляді блоків генерації, приймання та обробки інформаційних сигналів можна виконати в єдиному інтегральному виконанні.

Якщо порівнювати з існуючими способами реалізації вимірювання температури зі застосуванням оптико-волоконних сенсорів, з сенсорами у волоконно-оптичному та інтегральному виконанні, то має місце залежність зсуву за частотою їх спектральних характеристики, що залежить від зміни параметрів фізичних полів. Отже, розроблений спосіб на базі двохчастотного оптико-волоконного сенсора з можливістю визначення зміни параметрів за різницею фаз сигналів, що огинають, для вимірювального на опорного інформаційних сигналів не вимагає:

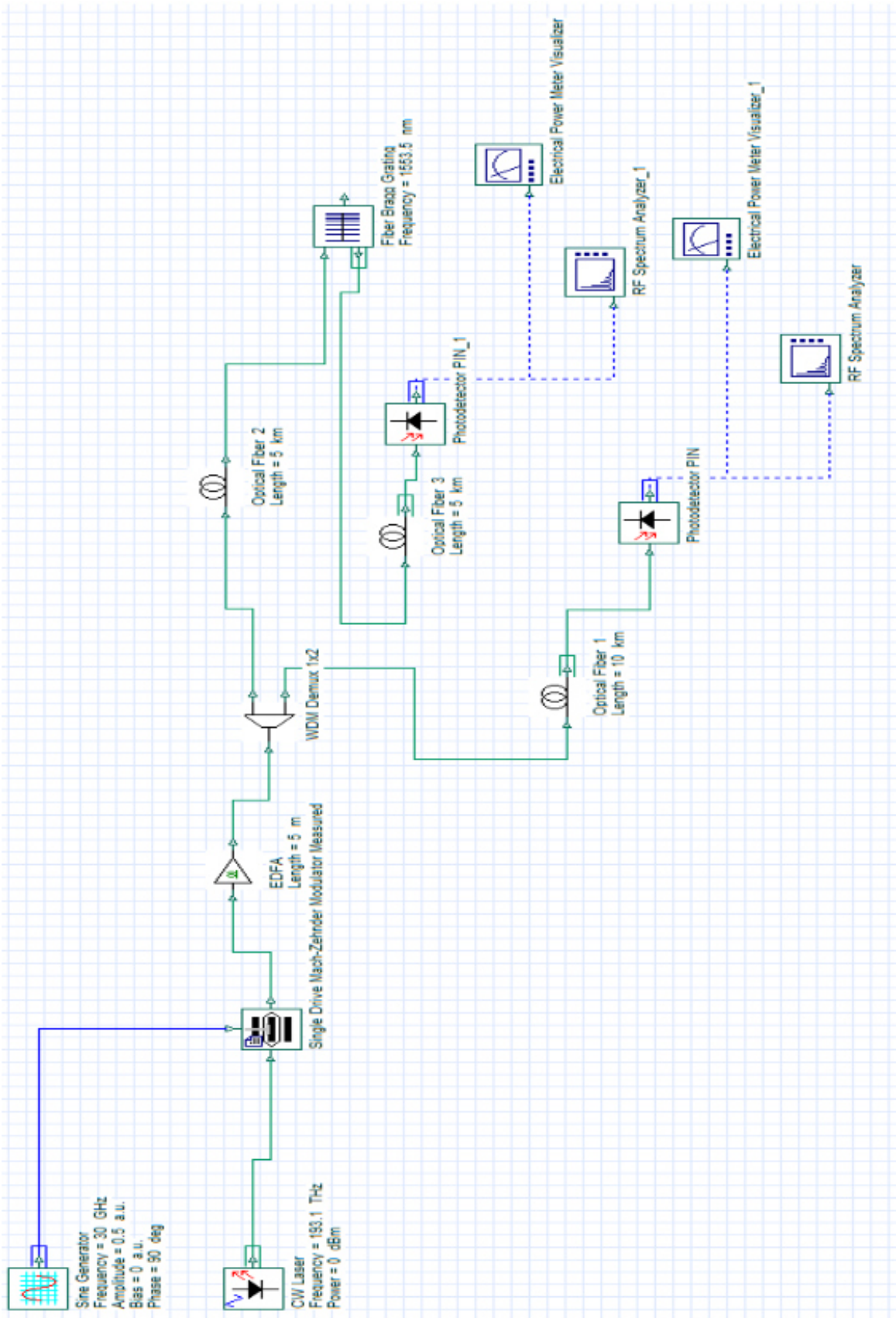


Рисунок 2.2 – Структурна схема електронного пристрою для двохчастотного моніторингу температури

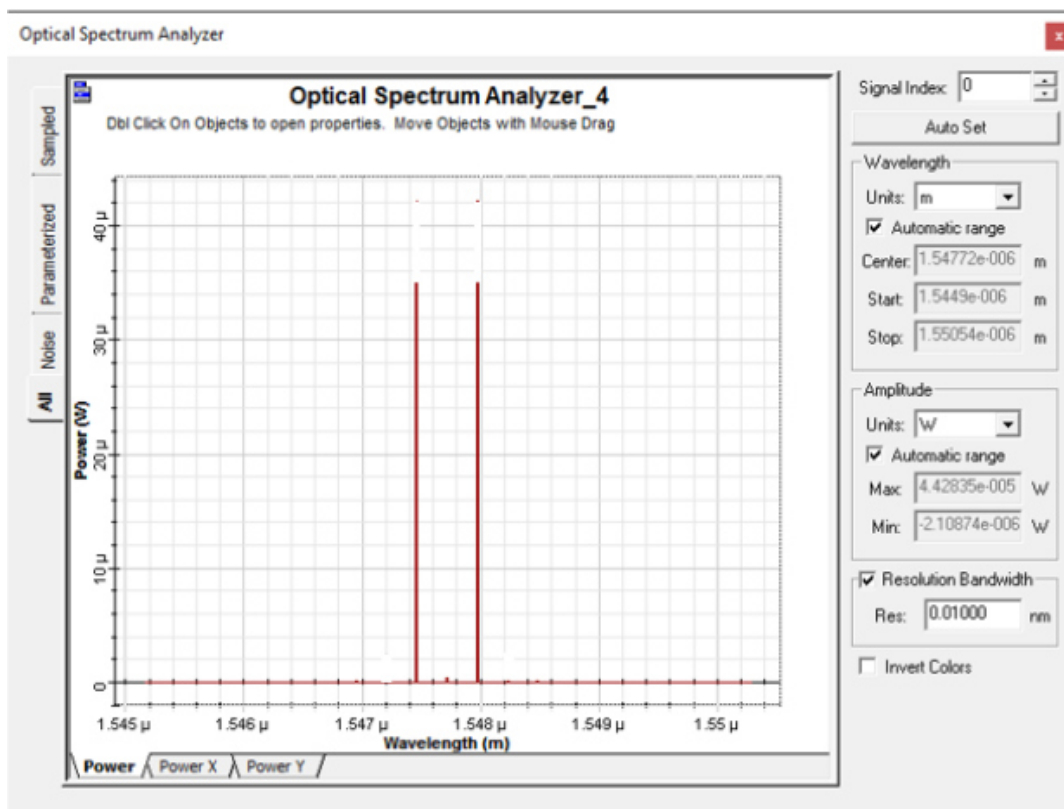


Рисунок 2.3 – Двохчастотний сигнал на вході ґрати з каліброваним значенням температури

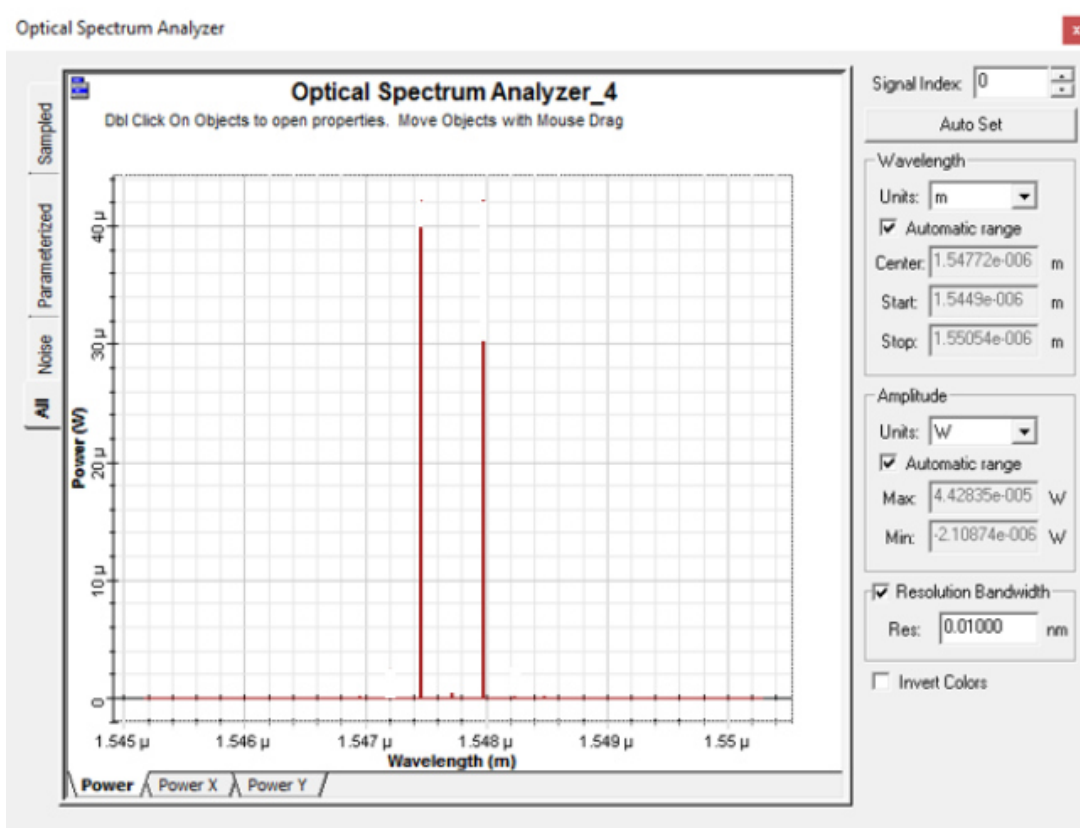


Рисунок 2.4 – Двохчастотний сигнал після зондування зі зсувом центральної частоти спектральної характеристики

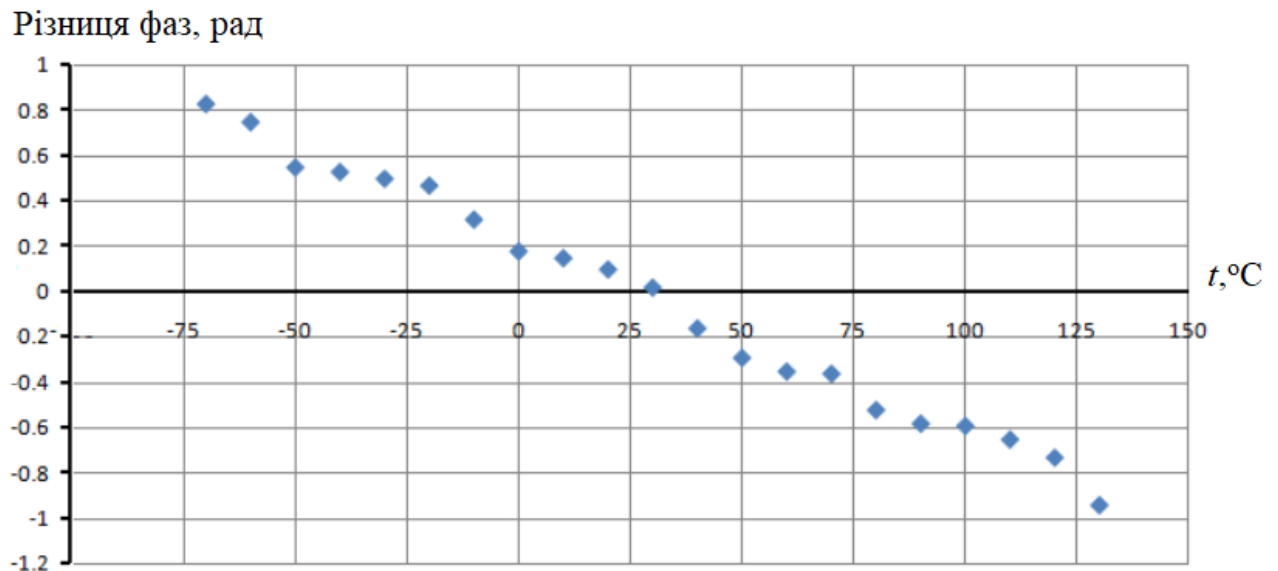


Рисунок 2.5 – Залежність зміни різниці фаз від температури

– використання складних оптико-електронних пристроїв визначення спектрального зсуву або детектування окремих спектральних ліній для подальшого порівняння, що істотно зменшує вартість проектного електронного пристрою;

– використання для аналізу оптичних сигналів вибірових компонентів, що мають власну залежність від змін вимірюваних параметрів і градієнтів цих параметрів;

– застосування амплітудного аналізу вимірювальних параметрів, на зміну яких значно впливають перешкоди та шуми різної природи.

Зазначені переваги дозволяють стверджувати про досягнення необхідних показників технічного завдання, а саме спрощення схемотехніки та конструкції електронного пристрою, підвищення точності результатів вимірювання температури, здешевлення виробу в цілому.

2.3 Аналіз складових похибок вимірювання температури

Існуючі способи цифрової фазометрії використовують модель гармонійного сигналу, який має постійне значення амплітуди та частотою [13], проте в реальних радіотехнічних вимірювачах застосовується модель квазігармонічного сигналу, що є більш адекватною [14].

Квазігармонійну модель необхідно використовувати під час розробки електронного вимірювального пристрою тому, що дві частотні складові сигналу зондування є квазігармонічними.

Утворення квазігармонійних коливань та їх структури можуть мати різні причини. Для математичного опису цих коливань у теперішній час використовується модель, яка базується на теорії амплітудно-модульованих коливань [15, 16].

Квазігармонійне коливання математично може бути описано такою залежністю:

$$s(t) = C(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi(t)),$$

де $\varphi(t)$ – фаза квазігармонічного коливання, що змінюється повільно, та не має компонент, які лінійно залежать від часу зміни несучої частоти ω_0 [15];

$C(t)$ – огибаюча функція або функція часу, що описує повільну зміну амплітудного значення [15].

Аналіз різних пристроїв та систем зі квазігармонічними коливаннями здійснюється в комплексному представлення аналітичного сигналу [15, 16].

$$\dot{Z}(t) = s(t) + j \cdot \bar{s}(t),$$

де $\bar{s}(t)$ – комплексно-сполучений процес, який пов'язаний з процесом $s(t)$ зі застосуванням перетворення Гільберта.

Наведене представлення зазвичай використовують в такому вигляді:

$$\dot{Z}(t) = C(t) \cdot e^{j\psi(t)},$$

що є знакозмінною функцією.

Аналітичний вигляд сигналу зі застосуванням наведеного алгоритму має такий вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_B(t) &= \cos(\omega_1 t) + j \sin(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t) + j \sin(\omega_2 t) = \\ &= \cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t) + j(\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)).\end{aligned}$$

Аналітичний вигляд огибаючої та зміна фази цього сигналу визначається за таким співвідношенням:

$$C(t) = \sqrt{(\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t))^2 + (\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t))^2};$$

$$\psi(t) = \arctan \frac{\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)}{\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)}.$$

Після здійснення перетворення маємо такий аналітичний вигляд для огибаючої та зміни фази:

$$C(t) = 2 \cdot \left| \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \cdot t\right) \right|;$$

$$\psi(t) = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \cdot t.$$

Умову зміни знаку можна записати так:

На рис. 2.6 позначено вектори A_1 та A_2 першої та другої складових двохчастотного сигналу. Модулі цих векторів дорівнюють значенням амплітуд A_1 та A_2 відповідно. Якщо прийняти загальне співвідношення $A_1 > A_2$, а значення початкової фази першої та другої складової цього двохчастотного сигналу $\theta_1 = \theta_2 + \pi$. Вектор A_1 знаходиться на осі ГО', а вектор A_2 здійснює обертання щодо A_1 з частотою Ω . Це дорівнює модулю між частотою першої й другої складових сигналу:

$$\Omega = |\omega_{01} - \omega_{02}|.$$

Відлік кута Ωt здійснюється від ГО'. Частота обертання A_2 вибирається за годинниковою стрілкою, також $\omega_{02} > \omega_{01}$. Вектор A є результатом підсумовування векторів A_1 та A_2 . Модуль вектору A визначається, як миттєве значення амплітуди двохчастотного сигналу; θ визначає миттєве значення фази вектору A , а φ та γ – кути між векторами A_1 та A_2 .

Наведена модуляція є амплітудно-фазовою або векторною. Значення похибки векторної модуляції є різниця між реальної та ідеальної траєкторіями або положеннями точок, що відповідає описаній модуляції.

Для побудови математичної моделі процесу вимірювання визначимо рівняння вимірювань [17]:

1. Сигнал, що передається до входу фотоприймача, переноситься з різницевою частотою $\omega_1 - \omega_2$.
2. Сигнал проміжної частоти перетворюється до цифрового вигляду в часовій ділянці зі застосуванням аналого-цифрового перетворювача.
3. Цифрові відліки сигналу передаються до програмного забезпечення, де здійснюється їх обробка зі застосуванням цифрового квадратурного модулятора.
4. Результати після програмної обробки представляються як часові залежності у вигляді демодульованої напруги, в полярній системі, векторного модуля похибки та ін.

З модуля векторної похибки, величина якої вимірюється аналізатором, є напруга $V_{\text{вим}}$, отже, рівняння вимірювань має такий вигляд [17]:

$$V_{\text{вим}} = F(X_{\text{ФП}}, X_{\text{АЦП}}, X_{\text{ЦОС}}, V_{\text{СРЧ}}),$$

де X_i – залежність результату вимірювання від зміни параметрів фотоприймача (ФП), аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та програмної компоненти цифрової обробки сигналу (ЦОС);

$X_{\text{СРЧ}}$ – складова сигналу різницевої частоти.

Ці параметри для зазначених пристроїв є:

- для фотоприймача фазові шумові складові лазера, власні теплові шуми, нелінійність характеристики перетворення, негармонійні та гармонійні спотворення, нелінійність амплітудно- та фазочастотної характеристик фільтра різницевої частоти;

- для АЦП є похибка квантування, нелінійність характеристики перетворення, похибка дискретизації;

- для програмної компоненти ЦОС є недостатнє значення частоти дискретизації під час обробки смуги частот, розрив за фазою між інформаційними пакетами, які мають різну частоту, некоректне застосування фільтрів і недостатнє значення швидкості передачі інформації.

З аналізу перерахованих дестабілізуючих факторів можна зробити висновок, що результат вимірювання векторної похибки залежить від зміни цих факторів, з яких не всі залежать від засобу вимірювання. Для спрощення аналізу складових похибок необхідно зробимо такі припущень:

- вплив зміни теплових і фазових шумів фотоприймача має достатньо невелике значення та під час аналізу його можна не враховувати;

- усі похибки, що пов'язано з процедурою налаштуваннями цифрових фільтрів у програмній компоненті, розглядається як складова похибки вхідного сигналу, яку можна не враховувати під час подальшого аналізу.

Отже, спрощене рівняння вимірювань матиме такий вигляд [17]:

$$V_{\text{вим}} = F(X_{\text{ФП}}, X_{\text{АЦП}}, X_{\text{ЦОС}}, V_{\text{СРЧ}}) \approx V_{\text{СРЧ}} + \Delta_{\text{ФП,АЦП}} + \Delta_{\text{ЦОС}},$$

де F – функція під час застосування найпростішої моделі має вигляд множника у форматі комплексного числа;

$\Delta_{\text{ФП,АЦП}} + \Delta_{\text{ЦОС}}$ – похибки, що вносяться аналізатором спектра, до складу якого входить аналого-цифровий перетворювач, та програмна компонента цифрової обробки інформаційних повідомлень.

Якщо використати більш складну модель, яка має достатньо велику кількість змінних, то можна одержати більш точні оцінки похибок вимірювання, проте застосування точної моделі більш ускладнює процес аналізу. Визначення значень складових, які входять до рівняння вимірювань, можна звести до оцінок похибок, що можна одержати під час цифрової обробки вимірювальних сигналів зі застосуванням програмної компоненти та під час експериментальних досліджень $\delta_{\text{ФП,АЦП}}$ [17].

З аналізу одержаного результату, а також на базі експериментальної оцінки параметрів апаратних компонентів електронного пристрою, величина сумарної похибки генератора та програмної компоненти цифрової обробки сигналів складає не більше 0,3 %, а тільки похибка програмної компоненти цифрової обробки сигналів становить не більше 0,1%.

Якщо припустити, що внесок до сумарної похибки рівномірно розподілений між фотоприймачем і генератором, а також ці похибки не є корельовано між собою, то величина похибка аналізатора складає 0,3%. Наведена оцінка практично співпадає з довідниковими параметрами фазометра типу ADL5511, який виготовляється компанією Analog Devices. Похибка відновлення різниці фаз φ_0 є не більше $2 \cdot 10^{-6}$ рад у діапазоні від 0 до $\pi/2$ під час реалізації способу обробки, що наведений в [13]. Значення оцінки похибки вимірювань за амплітудою та фазою зі застосуванням способу визначення

параметрів векторної модуляції складає $(3 - 5) \cdot 10^{-3}$ під час зміни коефіцієнта амплітудної модуляції в діапазоні від 0 до 100%, а фази в межах від 0 до π [17]. Застосування способу параметричних вимірювань різниці фаз квазігармонічних сигналів дозволяє мінімізувати величину відносної похибки вимірювань до 10^{-4} під час зміни фази у межах від 0 до π та, якщо має місце амплітудна модуляція, що у даному випадку є паразитною або шумовою [13].

Якщо має місце зміна центральної довжини хвилі на $(10 - 15)$ пм на кожний 1°C , то різниця ходу під час зміни температури на $\pm 50^\circ\text{C}$ складає 1 нм. Якщо поставити у відповідність цієї різниці ходу півширину в 1 нм вибіркової брегівської ґрати, то одержимо зміну різниці фаз $\pm\pi/2$. У відповідності до значення похибки результату вимірювання різниці фаз $\pm 3,14 \cdot 10^{-4}$ рад складає $\pm 0,01^\circ\text{C}$. Величина абсолютної похибки вимірювання температури становить не більше $\pm 0,1^\circ\text{C}$, що дає змогу використовувати цей спосіб для вимірювання температури в пристроях пасивних оптичних мереж.

2.4 Висновки

Запропоновано та розроблено спосіб двохчастотного симетричного зондування вибіркової брегівської ґрати для вимірювання значення температури або визначення спектральних характеристик, що обумовлено її зміною. Спосіб засновано на аналізі залежності зміни температури від різниці фаз між огинаючою вхідної та вихідної складових оптичного випромінювання. Розроблено схему електричну структурну оптико-електронного пристрою, що реалізує цей спосіб. Зі застосуванням способу можна з високою роздільною здатністю визначати величину центральної частоти. Схема дозволяє на два порядки підвищити відношення сигнал/шум під час вимірювання, має простоту у виконанні процедури визначення спектральних характеристик і параметрів вибіркової брегівської ґрати.

Моделювання роботи способу виконано в пакеті прикладних програм OptiSystem. Під час моделювання одержано результати, які підтверджують можливість використання запропонованого способу для вимірювання температури та визначення спектральних характеристик вибіркової брегівської ґрати, що обумовлено зміною температури.

Під час оцінки показників точності вимірювання параметрів сигналу за двома складовими сигналу оптичного випромінювання запропоновано підходи, що базуються на теорії квазігармонічних коливань. Якщо має місце зміна центральної довжини хвилі на $(10 - 15)$ пм на кожний 1°C , то різниця ходу під час зміни температури на $\pm 50^\circ\text{C}$ складає 1 нм. Якщо поставити у відповідність цієї різниці ходу півширину в 1 нм вибіркової брегівської ґрати, то одержимо зміну різниці фаз $\pm\pi/2$. У відповідності до значення похибки результату вимірювання різниці фаз $\pm 3,14 \cdot 10^{-4}$ рад складає $\pm 0,01^\circ\text{C}$. Величина абсолютної похибки вимірювання температури становить не більше $\pm 0,1^\circ\text{C}$, що дає змогу використовувати цей спосіб для вимірювання температури в пристроях пасивних оптичних мереж.

3 РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Розробка стенду для вимірювання температури

Для проведення досліджень та градуювання волоконно-оптичних сенсорів температури на базі вибіркової брегівської ґрати розроблено лабораторний стенд, структурну схему якого наведено на рис. 3.1, а конструкцію камери наведено на рис. 3.2.

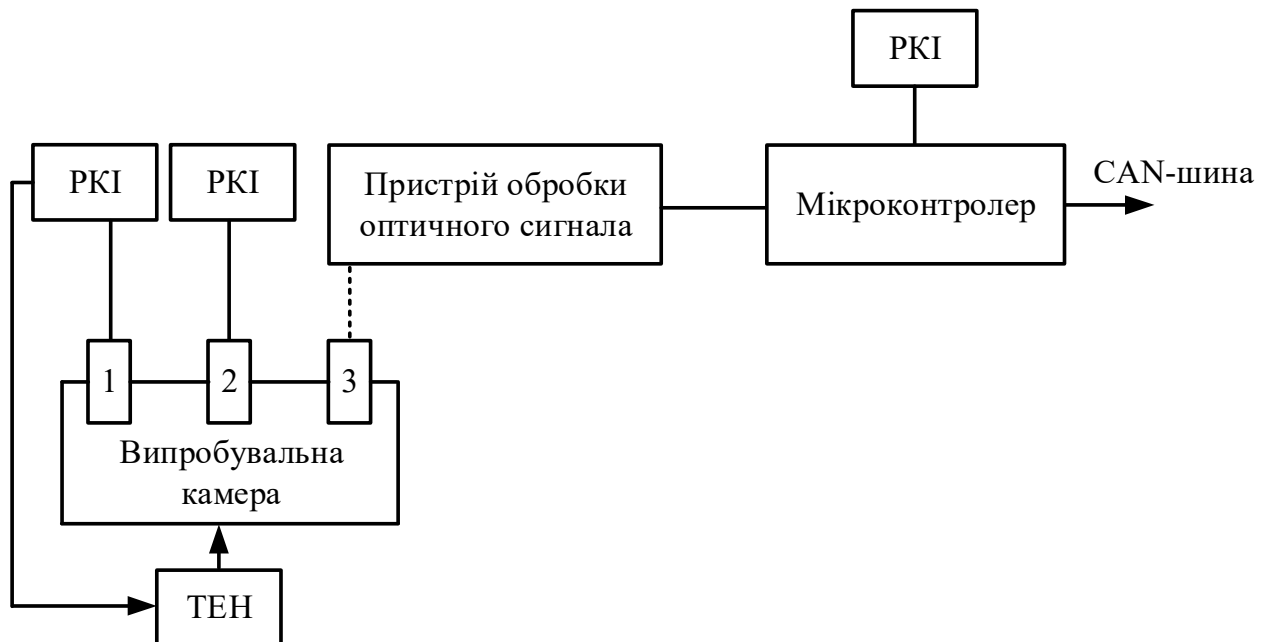


Рисунок 3.1 – Структурна схема лабораторного стенда для дослідження волоконно-оптичних сенсорів температури

У лабораторному стенді застосовуються три типи сенсорів температури.

Сенсор 1 – термоопір з платини, який має характеристику 50П типу ДТС035 та діапазон зміни робочих температур від -50 до $+500^{\circ}\text{C}$. Класом точності відповідає допуску А, а похибки вимірювання визначаються за ДСТУ 6.083-80. Сенсор підключається до двоканального мікропроцесора типу 2ТРМ1, яке виконує індикацію температури робочого тіла, що знаходиться у

випробувальній камері, а також здійснює включення та виключення ТЕН завдяки завданню уставки за температурою.

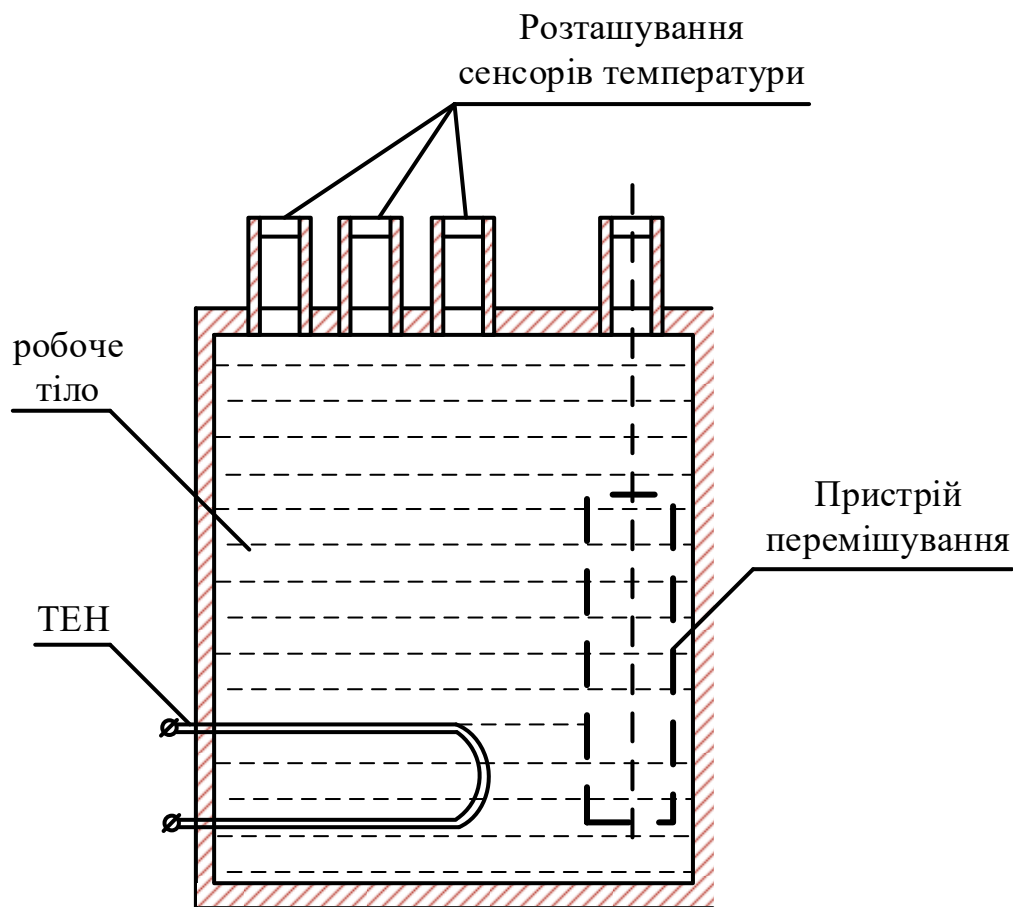


Рисунок 3.2 – Конструкція випробувальної камери

Сенсор 2 є лабораторним термометром, який повинен мати діапазон робочих температур від -50 до $+300^{\circ}\text{C}$. Роздільна здатність термометра повинна складати $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$, а величина абсолютної похибки вимірювання $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$. Зазначений термометр в стенді використовується як зразковий засіб вимірювання температури.

Сенсор 3 є розробленим волоконно-оптичним сенсором температури, який має конструкцію циліндра з нержавіючої сталі, діаметр циліндра складає 8 мм, а його довжина 50 мм, всередині цього циліндра розташовано вибірку брегівську ґрату (див. рис. 3.3).

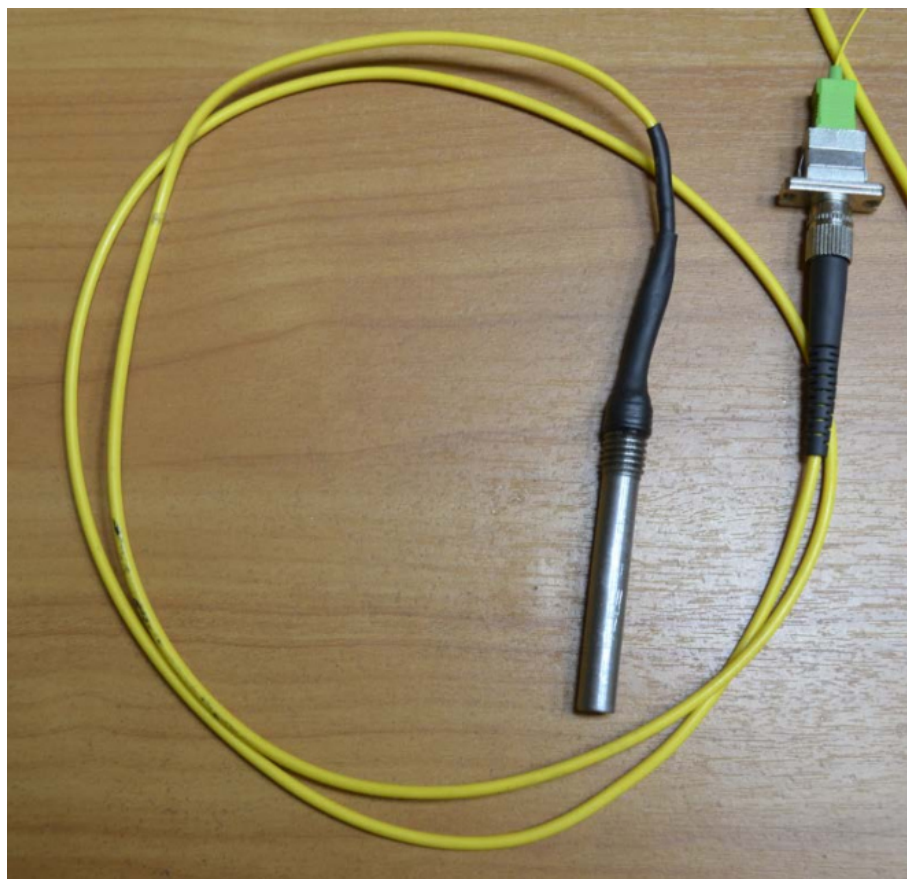


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд волоконно-оптичного сенсора температури

У випробувальній камері створюється, а також здійснюється регулювання та підтримання потрібної температури, що є рівномірною за його обсягом. Випробувальна камера є баком, який виготовлено з нержавіючої сталі, яка має товщину 2 мм, а геометричні розміри баку становлять $250 \times 250 \times 100 \text{ мм}^3$:

- отвори для встановлення сенсорів температури;
- нагрівальний елемент (ТЕН), за допомогою якого здійснюється нагрівання тіла до потрібної температури. Вимірювальний контроль виконується зі застосуванням одного з сенсорів під час включення та виключення нагрівача, якщо досягнуто робочим тілом встановленої температури;
- пристрій перемішування створює рівномірний розподіл температури за всім об'ємом випробувальної камери завдяки створенню конвекції. Як пристрій перемішування використано електричний двигун типу ДП25 з міксером.

3.2 Широкосмуговий пристрій обробки оптичного сигналу

Пристрій обробки оптичного сигналу застосовується для формування контуру відображення вибіркової брегівської ґрати, а також вимірювання її центральної довжини хвилі, величина якої прямо пропорційна залежить від зміни температури. Структурну схему широкосмугового пристрою обробки оптичного сигналу наведено на рис. 3.4.

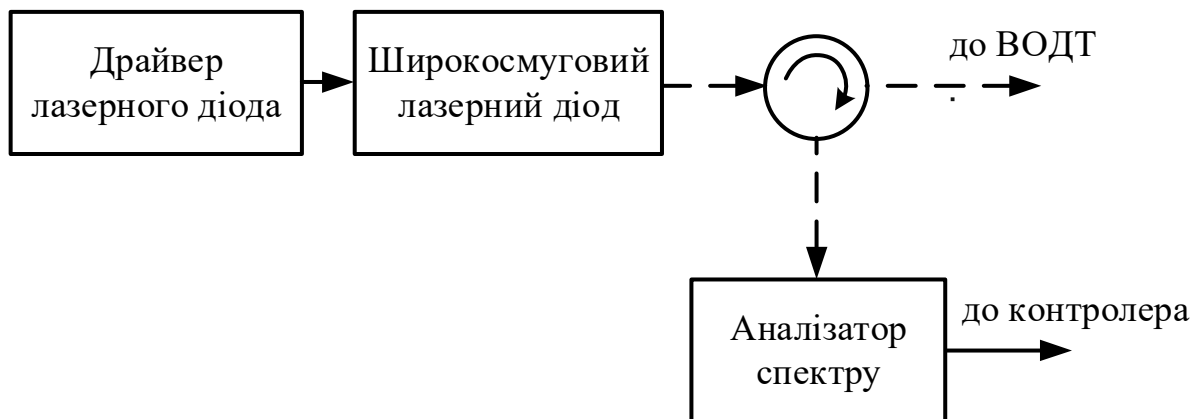


Рисунок 3.4 – Структурна схема широкосмугового пристрою обробки оптичного сигналу

Завдяки застосуванню широкосмугового лазерного діода формується оптичне випромінювання в межах від 1420 до 1620 нм. Для забезпечення стабільності роботи лазерного діода застосовується драйвер. Широкосмугове оптичне випромінювання, яке пройшло через циркулятор, передається до волоконно-оптичного сенсора температури. Віддзеркалений оптичний сигнал від сенсора через циркулятор спрямовується до аналізатора спектра, який виконує вимірювання значення центральної довжини брегівської хвилі λ_{BG} , а потім електричний сигнал величина, якого є пропорційною від зміни температури, передається для обробки до мікроконтролера.

Як широкосмуговий лазерний діод використано діод типу SLD-761, який виготовляється фірмою Superlum.

Драйвер лазерного діода забезпечує його живлення лазерного діода з



Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд аналізатора спектр I-MON 512E-USB

Принцип аналізатора спектра базується на способі спектрального розкладання оптичного випромінювання світла дифракційною ґратою. Ці ґрати є сукупністю доволі великої кількості розташованих штрихів, які мають форму виступів або щілин, що нанесено на поверхню.

Оптичний сигнал, який пройшов дифракційну ґрату, утворює дифракційну картину, яка передається на пристрій зі зарядовим зв'язком.

Під час зміни спектра оптичного сигналу відбувається змінення дифракційної картини, що змінює вихідний сигнал пристрою зі зарядовим зв'язком.

Вихідний сигнал представлено як масив дискретних значень з певною амплітудою. Кількість відліків дорівнює значенню пристрою зі зарядовим зв'язком. Амплітудне значення відповідає оптичному сигналу на певній довжині хвилі оптичного випромінювання.

У аналізаторі спектру використовується лінійка зі зарядовим зв'язком, кількість пікселів якої дорівнює 512.

3.3 Вузькосмуговий пристрій обробки оптичного сигналу

Структурну схему вузькосмугового пристрою обробки оптичного сигналу на базі двохчастотного зондування наведено на рис. 3.7.

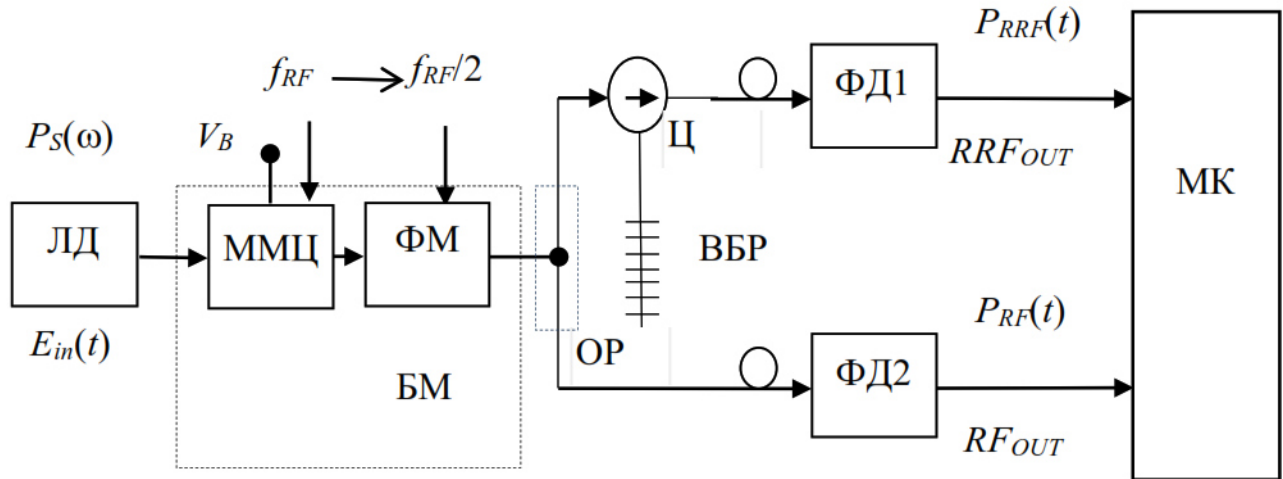


Рисунок 3.7 – Структурна схема вузькосмугового пристрою обробки оптичного сигналу на базі двохчастотного зондування

Електронний пристрій має в своєму складі лазерний діод (ЛД) типу DFB, блоку модуляторів (БМ), до складу якого входить амплітудний модулятора (ММЦ) та фазовий модулятор (ФМ), оптичні розгалужувачі (ОР) на базі вибіркової брегівської ґрати, які підключено до лазера та фотодетектору через циркулятор Ц, два фотодетектори (ФД) та мікроконтролер (МК), який застосовується для визначення вимірювального значення температури.

Оптичний сигнал, який є несучим коливанням на частоті ω_0 , від лазерного діода передається до блоку модуляторів БМ. У цьому блоці здійснюється модуляція низькочастотним сигналом, у якого частота смуги пропускання дорівнює смузі пропускання селективного елемента, а після цього сигнал розділяється на два канали за допомогою оптичного розгалужувача. У першому каналі оптичне випромінювання через вхід циркулятора передається до вибіркової брегівської ґрати, потім віддзеркалюється від ґрати та з виходу циркулятора подається до першого фотоприймача (ФД1). Другий канал, до складу якого входить ФД2, застосовується як опорний. У мікроконтролер

надходять два низькочастотні сигнали різниці фаз з виходів фотоприймачів ФД1 та ФД2. Завдяки цим двом сигналам визначається функція порівняння фаз, зміна значень якої пропорційна від температури. Вихідне оптичне випромінювання блоку модуляторів є двохчастотним $f_0 - f_{RF}$ та $f_0 + f_{RF}$ з несучою частотою f_0 та рівними амплітудами вихідного сигналу.

Для реалізації способу амплітудно-фазового модуляційного перетворення застосовано модулятори типу JDSU.

Для здійснення амплітудної модуляції застосовано модулятор інтенсивності типу JDSU APE Microwave Analog, який має смугу частот 20 ГГц та напівхвильову напругу 3,3 та 5, зовнішній вигляд цього модулятора наведено на рис. 3.8 (зверху). Геометричні розміри модулятора: довжина 120 мм, а його ширина складає 15 мм. Нерівномірність частотної характеристики у діапазоні частот від 0,13 ГГц до 20 ГГц складає 7 дБ.



Рисунок 3.8 – Модулятори інтенсивності типу JDSU APE Microwave Analog (зверху) та фази типу JDSU APE Phase (знизу)

Для здійснення фазової модуляції використовується модулятор фази типу JDSU APE Phase, який має смугу частот 10 ГГц, зовнішній вигляд цього модулятора наведено на рис. 3.8 (знизу). Геометричні розміри модулятора фази приблизно дорівнюють розмірам модулятора інтенсивності. Модулятор не

потребує встановлення робочої точки. Діапазон робочих довжин хвиль оптичного випромінювання знаходиться в межах від 1550 до 1625 нм. Втрати сигналу для зазначених модуляторів складають не більше 3 дБ. Максимальне значення вхідної потужності становить 200 мВт.

Для спрощення конструкції електронного пристрою застосовано лише один амплітудний модулятор, який функціонує в нульовій робочій точці та забезпечує формування на виході двохчастотного оптичного випромінювання з придушенням несучою частоти [6].

3.4 Висновки

Розроблено волоконно-оптичні сенсори температури, зі застосуванням яких можна виконувати вимірювання абсолютних значень температури з показниками точності, що визначено в технічних вимогах.

Для досліджень волоконно-оптичних сенсорів розроблено установки з обліком конструктивних особливостей сенсорів, що дає змогу виконувати налаштування центральної довжини хвилі сигналів неузгодженості пасивних оптичних мереж.

ВИСНОВКИ

Виконано аналіз існуючих способів і засобів вимірювання зміни зовнішніх параметрів: температури та напруження. Ці параметри визначають спектральні характеристики селективних компонентів пасивних оптичних мереж зі застосуванням волоконно-оптичних сенсорів.

Під час аналізу встановлено, що перспективними способами є способи, які базуються на використанні як чутливого елемента сенсора вибіркової брегівської ґрати зі застосуванням двохчастотного симетричного зондування з визначенням впливу на базі інтегрального аналізу за фазою або огинаючого відбитого, або зондуючого оптичного випромінювання.

Ретельний аналіз можливих варіантів побудови сенсорів на базі вибіркової брегівської ґрати показав, що перспективною є застосування ґрат зі структурованим фазовим зсувом. Ці ґрати мають один або кілька ширококутових і вузькокутових вікон прозорості, що мають чергування. Під час зондування перших можна істотно підвищити роздільну здатність вимірювань зі збереженням базових закономірностей передачі вимірювальної інформації.

Запропоновано та розроблено спосіб двохчастотного симетричного зондування вибіркової брегівської ґрати для вимірювання значення температури або визначення спектральних характеристик, що обумовлено її зміною. Спосіб засновано на аналізі залежності зміни температури від різниці фаз між огинаючою вхідної та вихідної складових оптичного випромінювання. Розроблено схему електричну структурну оптико-електронного пристрою, що реалізує цей спосіб. Зі застосуванням способу можна з високою роздільною здатністю визначати величину центральної частоти. Схема дозволяє на два порядки підвищити відношення сигнал/шум під час вимірювання, має простоту у виконанні процедури визначення спектральних характеристик і параметрів вибіркової брегівської ґрати.

Моделювання роботи способу виконано в пакеті прикладних програм OptiSystem. Під час моделювання одержано результати, які підтверджують можливість використання запропонованого способу для вимірювання температури та визначення спектральних характеристик вибіркової брегівської ґрати, що обумовлено зміною температури.

Під час оцінки показників точності вимірювання параметрів сигналу за двома складовими сигналу оптичного випромінювання запропоновано підходи, що базуються на теорії квазігармонічних коливань. Якщо має місце зміна центральної довжини хвилі на $(10 - 15)$ пм на кожний 1°C , то різниця ходу під час зміни температури на $\pm 50^\circ\text{C}$ складає 1 нм. Якщо поставити у відповідність цієї різниці ходу півширину в 1 нм вибіркової брегівської ґрати, то одержимо зміну різниці фаз $\pm\pi/2$. У відповідності до значення похибки результату вимірювання різниці фаз $\pm 3,14 \cdot 10^{-4}$ рад складає $\pm 0,01^\circ\text{C}$. Величина абсолютної похибки вимірювання температури становить не більше $\pm 0,1^\circ\text{C}$, що дає змогу використовувати цей спосіб для вимірювання температури в пристроях пасивних оптичних мереж.

Розроблено волоконно-оптичні сенсори температури, зі застосуванням яких можна виконувати вимірювання абсолютних значень температури з показниками точності, що визначено в технічних вимогах.

Для досліджень волоконно-оптичних сенсорів розроблено установки з обліком конструктивних особливостей сенсорів, що дає змогу виконувати налаштування центральної довжини хвилі сигналів неузгодженості пасивних оптичних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Васильев, С.А. Фотоиндуцированные волоконные решетки показателя преломления и их применения / С.А. Васильев, О.И. Медведков, И.Г. Королев и др. // Фотон-Экспресс. Наука. – 2004. – №6. – С. 163 – 183.
2. Kulchin, Yu.N. Differential reflectometry of FBG sensors in the wide spectral range / Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, A.V. Dyshlyuk etc // Laser Physics. – 2011. – № 21(2). – P. 304 – 307.
3. Srimannarayana, K. Fiber Bragg grating and long period grating sensor for simultaneous measurement and discrimination of strain and temperature effects / K. Srimannarayana etc // Optica Applicata. – 2008. – V. XXXVIII (3). – P. 601 – 609.
4. Морозов, О.Г. Амплитудно-фазовое преобразование частоты в системах временной и частотной рефлектометрии волоконно-оптических информационных и измерительных сетей / О.Г. Морозов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2004. – Т. 7. – № 1. – С. 63 – 67.
5. WO 020838. Thermal drift compensation system and method for optical network / Weaver T. 2008. – 40 p.
6. Морозов, О.Г. Синтез двухчастотного излучения и его применения в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений / О.Г. Морозов, Д.Л. Айбатов, Т.С. Садеев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13. – № 3. – С. 84 – 91.
7. Mun, Sil-Gu. Wavelength initialization employing wavelength recognition scheme in WDM-PON based on tunable lasers / Sil-Gu Mun, Eun-Gu Lee, Jong Hyun Lee etc // Optical Fiber Technology. – 2015. – №. 21. – P. 141 – 145.
8. Li, H. Preliminary investigation of an SOI-based arrayed waveguide grating Demodulation integration microsystem / H. Li, W. Zhou, Y. Liu etc // Sci. Rep. – 2014. – № 4 (4848). – P. 1 – 6.
9. ITU-T, G-series Recommendations - Supplement 39 – Optical system design and engineering considerations, Dec. 2008. [Online]. Available from:

<http://www.itu.int/rec/TREC-G.Sup39-200812-I>.

10. Stepustchenko, O.A. Optical refractometric FBG biosensors: problems of development and decision courses / O.A. Stepustchenko, O.G. Morozov, A.N. Gorshunova etc // Proc. of SPIE. – 2011. – № 7992. – P. 79920D.

11. Wei, L. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors / L. Wei, H. Yanyi, X. Yong etc // Applied Physics Letters. – 2005. – № 86. – P. 122 – 151.

12. Севастьянов, А.А. Формирование многочастотного излучения в двухпортовом модуляторе Маха-Цендера / А.А. Севастьянов, О.Г. Морозов, А.А. Талипов и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 4. – С. 232 – 236.

13. Игнатъев, В.К. Измерение разности фаз квазигармонических сигналов в реальном времени / В.К. Игнатъев, А.В. Никитин, В.Х. Бернардо и др. // Наука и образование. – 2013. – № 7. – С. 241 – 256.

14. Ильин, Г.И. К теории квазигармонических колебаний / Г.И. Ильин, А.Г. Ильин, О.Г. Морозов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 3(22). – С. 6 – 33.

15. Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – М.: Советское радио, 1966. – 677 с.

16. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 1983. – 536 с.

17. Пивак, А.В. Измерения параметров векторной модуляции / А.В. Пивак // Мир измерений. – 2008. – №5. – С. 24 – 32.

ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві

До приміщення науково-дослідного відділу та організації робочого місця з обліком шкідливих виробничих факторів пред'являється ряд вимог. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце з персональним комп'ютером, повинно мати природне освітлення, бажано з однобічним розміщенням світових прорізів, площа осклянілості яких не повинна перевищувати 25 % від площі стіни світових прорізів. Віконні прорізи в приміщенні з персональним комп'ютером повинні мати регульовані жалюзі чи занавіски або інші сонцезахисні пристрої. Не допускається розташування робочих місць з персональним комп'ютером у підвальних і цокольних поверхах. Робочі місця з персональними комп'ютерами рекомендується розміщувати в окремих приміщеннях. Площа на одного працюючого з персональним комп'ютером повинна складати 6 м², об'єм – 20 м³. Неприпустиме розташування персонального комп'ютера, під час якого працюючий звернений обличчям або спиною до вікон чи кімнати задньої частини персонального комп'ютера, де монтуються вентилятори.

Забороняється застосовувати для обробки інтер'єра приміщень з персональними комп'ютерами полімерні матеріали (дерев'яностружечні плити, шпалери, що миються, плівкові та рулоні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик та ін.), що виділяються в повітря шкідливі хімічні речовини, що перевищують гранично допустимі концентрації, не включені до «Переліку дозволених, МЗ» 1977-1985 р.

У лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідної роботи робочі місця з персональними комп'ютерами розташовані від стіни з вікнами на відстані 1 м, відстань між столами 3 м. Екрани моніторів знаходяться від очей користувача на відстані 700 мм відповідно до СН 512-78, приміщення ($S=21 \text{ м}^2$, $V=73,5 \text{ м}^3$) дозволяє розташовувати більше 3 робочих місця.

Робочі місця в положенні сидячі відповідають вимогам ДСТ 12.2.032 – 78 та ДСТ 12.2.029 – 77. Поверхня робочого столу знаходиться на висоті 0,75 м від підлоги, розміри робочої поверхні стільниці складають 1050x590 міліметрів, розміри вільного простору для ніг під столом складає висота 650, глибина 550, ширина 450 міліметрів, відповідно. Робочий стілець оснащений підйомно-поворотним пристроєм, що забезпечує регуляцію висоти сидіння та спинки, пневматичним і гідравлічними амортизаторами та обладнанні підлокітниками.

А.1 Мікроклімат робочого місця

У приміщенні науково-дослідного відділу є джерела тепловиділення, тому необхідно визначити необхідні умови його вентильовання. Витрати повітря в приміщенні з додатковим тепловиділенням визначаються за формулою:

$$L = \frac{Q_{\text{НАД}}}{c \cdot p \cdot (t_{\text{В}} - t_{\text{Н}})}, \quad (\text{A.1})$$

де $Q_{\text{НАД}}$ – надлишкове виділення тепла в робочому приміщенні, ккал/год.;

c – теплоємність повітря (0,237 ккал/кг);

p – об'ємна вага повітря (1,226 кг/м³);

$t_{\text{В}}$ – температура витяжного повітря (30°C);

$t_{\text{Н}}$ – температура приточного повітря (20°C).

Розраховується надлишкове надходження тепла за формулою:

$$Q_{\text{НАД}} = Q_{\text{УСТ}} + Q_{\text{ПЕР}} + Q_{\text{ОСВ}} + Q_{\text{СР}}, \quad (\text{A.2})$$

де $Q_{\text{уст}}$ – виділення тепла від устаткування;

$Q_{\text{пер}}$ – виділення тепла від персоналу;

$Q_{\text{осв}}$ – надходження тепла від електричного освітлення;

$Q_{\text{ср}}$ – надходження тепла від сонячної радіації через вікна.

Визначається виділення тепла від устаткування за формулою:

$$Q_{\text{уст}} = P \cdot K_a \cdot K_6 \cdot 860, \quad (\text{A.3})$$

де P – сумарна потужність устаткування, кВт/год;

K_a – коефіцієнт установленної потужності (0,95);

K_6 – коефіцієнт одночасної роботи (1,0).

$$\begin{aligned} Q_{\text{уст}} &= [x_1 \cdot k_1 + x_2 \cdot k_2 + x_3 \cdot k_3 + x_4 \cdot k_4 + x_5 \cdot k_5 + x_6 \cdot k_6 + x_7 \cdot k_7 + \\ &+ x_8 \cdot k_8 + x_9 \cdot k_9] \cdot K_a \cdot K_6 \cdot 860 = \\ &= [1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,06 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,6 + 4 \cdot 0,15 + \\ &+ 1 \cdot 3,5] \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 860 = 5131 \text{ ккал/год.} \end{aligned}$$

Визначається виділення тепла від обслуговуючого персоналу за допомогою формули:

$$Q_{\text{пер}} = n \cdot g = 2 \cdot 100 = 200 \text{ ккал/год,} \quad (\text{A.4})$$

де n – кількість працюючих;

g – кількість тепла, що виділяє один працівник за годину (100 ккал/год.).

Визначається надходження тепла від електричного освітлення за формулою:

$$Q_{\text{осв}} = E_m \cdot g_1 \cdot S = 300 \cdot 0,05 \cdot 21 = 315 \text{ ккал/год,} \quad (\text{A.5})$$

де E_M – нормована освітленість для зорової роботи, величина якої дорівнює 300 лк;

g_1 – питома тепловиділення на 1 м² підлоги під час освітленості в 1 лк (для люмінесцентних ламп – 0,05 ккал/год.);

S – площа приміщення, м².

Визначається надходження тепла від сонячної радіації через вікна за формулою:

$$Q_{CP} = F \cdot g_2 \cdot K_{OCL} = 7,5 \cdot 65 \cdot 0,4 = 195 \text{ ккал/год}, \quad (A.6)$$

де F – площа віконних прорізів (3 x 2,5=7,5 м²);

g_2 – кількість тепла, що надходить через 1 м² віконного прорізу (65 ккал/год.);

K_{OCL} – коефіцієнт ослаблення, приймається 0,4.

Визначається кількість надлишкового тепла:

$$Q_{HAД} = Q_{УСТ} + Q_{ПЕР} + Q_{OCB} + Q_{CP} = 5131 + 200 + 315 + 195 = 5841 \text{ ккал/год.}$$

Визначаються витрати повітря в приміщенні:

$$L = \frac{Q_{HAД}}{c \cdot p \cdot (t_B - t_H)} = \frac{5848}{0,237 \cdot 1,226 \cdot (30 - 20)} = 2010 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Існуюча в наявності система кондиціонування та вентилявання має продуктивність 2200 м³/год., що задовольняє необхідним нормативам.

Параметри мікроклімату на робочих місцях регламентуються ДНАОП 0.03.3.15 – 86 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень № 4088–86». Відповідно доданих санітарних норм температура повітря, швидкість руху повітря та відносна вологість у холодні періоди року повинна складати

(22 – 24) градуса за Цельсієм, 0,1 метра в секунду та (40 – 60) %, відповідно. Під час збереження всіх параметрів можливе коливання температури від 21 до 25 градусів Цельсія. У теплі періоди року температура повітря повинна складати (23 – 25) градусів Цельсія, швидкість руху повітря (0,1 – 0,2) метрів в секунду, вологість (40 – 60) %. Температура може коливатися від 22 до 26 градусів Цельсія під час збереження всіх інших параметрів мікроклімату. Вище зазначені норми цілком відповідають фактичним даним приміщення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідним відділом.

А.2.2 Розрахунок системи загального рівномірного освітлення з лампами розжарювання для приміщення, в якому використовуються зорові роботи високої точності

Розміри приміщення: довжина ($a=6$ м), ширина ($b=3,5$ м), висота ($H=3,5$ м). Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття $P_{\text{стелі}} = 70$ %, $P_{\text{стін}} = 50$ %. Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,7$ м. Для освітлення прийнято світильники типу УПМ-15, що розташовано на стелі, відстань від світильника до стелі $h_c = 0,4$ м. Мінімальна освітленість за нормами $E=200$ лк.

1) Визначається висота підвісу світильників над підлогою:

$$h_0 = H - h_c = 3,5 - 0,4 = 3,1 \text{ м.}$$

Для світильників загального освітлення з лампами розжарювання потужністю до 200 Вт мінімальна висота підвісу над підлогою відповідно до СНІП П-4-79 повинна бути в межах (2,5 – 4,0) м, залежно від характеристики світильника. Освітлення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідного відділу відповідає цій вимозі.

2) Визначається висота підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = h_0 - h_p = 3,1 - 0,7 = 2,4 \text{ м.}$$

Рівномірність освітлення досягається під час відповідного співвідношення відстані між світильниками (L) та висоти їх підвісу (h).

3) Визначається рекомендована відстань між світильниками:

$$L = 0,7 \cdot h = 0,7 \cdot 2,4 = 1,68 \text{ м.}$$

4) Розраховується необхідна кількість світильників:

$$N = \frac{a \cdot b}{L^2} = \frac{6 \cdot 3,5}{1,68^2} = 7,4.$$

Приймається 8 світильників, з обліком розмірів приміщення вони розташовуються у два ряди по 4 штуки.

5) Світловий потік лампи світильника ($\Phi_{\text{л}}$) визначається за формулою:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot K_3 \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta},$$

де E – нормативна освітленість, лк;

K_3 – коефіцієнт запасу, який враховує зниження освітленості в результаті забруднення та старіння ламп;

S – площа приміщення, що освітлюється, м²;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення для ламп розширювання (1,15);

N – кількість світильників;

n – кількість ламп у світильнику;

η – коефіцієнт використання світового потоку, що визначається за світлотехнічними таблицями залежно від показника приміщення (i) та

коефіцієнтів відбиття стін і стелі.

6) Визначається показник приміщення:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 3,5}{3,5 \cdot (6 + 3,5)} = 2,21.$$

Коефіцієнт використання $\eta = 0,48$ для світильника УПМ-15 ($i = 2,5$, $P_{\text{стелі}} = 70\%$, $P_{\text{стін}} = 50\%$)

Світловий потік одного світильника, а значить і лампи, оскільки за конструктивним виконанням у світильнику цього типу встановлена лише одна лампа, дорівнює:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 21 \cdot 1,15}{6 \cdot 1 \cdot 0,48} = 1677 \text{ лм.}$$

9) обирається лампа Б-150 потужністю 150 Вт, світловий потік якої дорівнює 2000 лм. Хоча це значення на 19,2 % більше розрахованого, проте не перевищує встановлену норму ($-0\% < \Phi_{\text{л}} < +20\%$). Сумарна електрична потужність усіх світильників, встановлених у приміщенні становить:

$$P_{\text{св}} = P \cdot N = 150 \cdot 8 = 1200 \text{ Вт.}$$