МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший бакалаврський
(рівень вищої освіти)

на тему Розробка оптоволоконного датчика магнітного поля

Виконав: студент IV курсу, групи 6.1532
спеціальності *176 Мікро- та наносистемна техніка»*
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

Д.В. Скакунов
(ініціали та прізвище)

Керівник доцент кафедри ЕІСПЗ, доцент, к.ф.-м.н., Світанько М.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент професор кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, професор, д.т.н., Коваленко В.Л.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Факультет _____
Кафедра *електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення*
Рівень вищої освіти *перший бакалаврський*
Спеціальність *176 «Мікро- та наносистемна техніка»*
(код і назва)

Освітня програма *Мікро- та наносистемна техніка*
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *ЕІСПЗ*
Критська Т.В.
"*01*" червня 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Скакунову Дмитру Валерійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) *Розробка оптоволоконного датчика магнітного поля*

керівник роботи *Світанько Микола Вікторович, к.ф.-м.н., доцент*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "*23*" *грудня 2025 року* № *1830-с*

2 Строк подання студентом роботи *01 червня 2026 року*

3 Вихідні дані до роботи *Комірка Фарадея, 750 – 890 нм, 220 В, 3-12В, Multisim*

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*1. Оптичні методи вимірювання параметрів магнітного поля 2. Розробка оптоволоконного датчика магнітного поля 3. Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем оптоволоконного датчика магнітного поля*

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) *1. Структурна схема оптоволоконного датчика магнітного поля 2.*

Схема електрична оптоволоконного датчика магнітного поля *3. Моделювання функціональних блоків оптоволоконного датчика магнітного поля*

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	*Світанько М.В., доцент*	*23.12.2025*	*23.12.2025*
II	*Світанько М.В., доцент*	*23.12.2025*	*23.12.2025*
III	*Світанько М.В., доцент*	*23.12.2025*	*23.12.2025*

7 Дата видачі завдання *23 грудня 2025 року*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Літературний огляд*	*29.03.2026*	
2	*Розрахункова частина*	*26.04.2026*	
3	*Розробка заходів із охорони праці та техногенної безпеки*	*30.05.2026*	
4	*Розробка графічної частини роботи*	*30.05.2026*	
5	*Оформлення пояснювальної записки*	*30.05.2026*	
6	*Нормоконтроль*	*30.05.2026*	
7	*Попередній захист роботи*	*10.06.2026*	

Студент _____ *Скакунов Д.В.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ *Світанько М.В.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ *Верьовкін Л.Л.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Реферат

Дипломна робота містить 61 сторінку, 27 рисунків, 2 таблиці, 25 джерел літератури.

Об’єкт дослідження – оптичні реєстратори магнітних полів.

Мета роботи – розробка оптоволоконного датчика магнітного поля.

Завдання роботи – розробити структурну схему оптоволоконного датчика магнітного поля; розробити електричні схеми основних апаратурних блоків пристрою; провести моделювання роботи електричних схем пристрою.

Методика досліджень – моделювання пристрою за допомогою програмного забезпечення Multisim.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено модель оптоволоконного датчика магнітного поля на основі елемента Фарадея із тербій-галієвого гранату (TGG, $Tb_3Ga_5O_{12}$).

Результати впроваджень – макет електронного приладу пройшов випробовування на кафедрі ЕІСПЗ.

Прогнозні пропозиції – подальше вдосконалення пристрою передбачає підтримку інтерфейсів SPI, SMBus(I2C), UART(RS-232/485), що надає можливість використання програмованих мікроконтролерів для підвищення роздільної здатності сигналу в умовах високого рівня шумів.

ЕФЕКТ ФАРАДЕЯ, ОПТОВОЛОКНО, ЛАЗЕРНИЙ ДІОД, МІКРОКОНТРОЛЕР, MULTISIM.

Дипломну роботу виконано на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення з 23.12.2025 р. по 10.06.2026 р.

ЗМІСТ

Стор.

Вступ ……. 6

1. Оптичні методи вимірювання параметрів магнітного поля …… 7

1.1 Магнітооптичні ефекти……. 7

1.1.1 Загальна характеристика…… 7

1.1.2 Ефект Коттона–Мутона……. 7

1.1.3 Магнітооптичний ефект Керра…….. 8

1.1.4 Ефе́кт Фарадéя…… 11

1.2 Оптоволоконні датчики …..... 12

1.3 Оптоволоконний датчик вимірювання магнітного поля на основі ефекта Фарадея……. 17

2. Розробка оптоволоконного датчика магнітного поля……... 21

2.1 Структурна схема оптоволоконного датчика магнітного поля……. 21

2.2 Світловипромінююча система датчика магнітного поля…….. 25

2.2.1 Оптоволокно датчика магнітного поля……. 25

2.2.2 Джерело випромінювання……. 27

2.3 Мікроконтролерна система реєстрації сигналу оптоволоконного датчика магнітного поля……. 34

2.4 Моделювання функціональних блоків електрооптичної складової датчика магнітного поля……. 40

2.4.1 Моделювання схеми стабілізації лазерного світлодіода датчика магнітного поля…… 40

2.4.2 Моделювання роботи схеми реєстратора ІЧ випромінювання датчика магнітного поля……. 41

3 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем оптоволоконного датчика магнітного поля ……. 44

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих

факторів…… 44
3.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів…… 46
3.3 Виробнича санітарія……... 46
3.4 Електробезпека……... 48
3.5 Пожежна та техногенна безпека об’єкту …….. 49
3.6 Розрахунок штучного освітлення точковим методом …… 50
Висновки та рекомендації……... 55
Перелік посилань…….…… 57
Додаток 1……. 60

Вступ

Результати дослідження, опублікованого в журналі Nature's Scientific Reports, кидають виклик традиційному розумінню ефекту Фарадея. Це основоположний принцип електромагнетизму, відкритий Майклом Фарадеєм 1845 року [1,2].

Фізики з'ясували, що магнітний вплив світла є більш істотним під час взаємодії з речовиною, ніж передбачалося. Раніше цей фактор вважався незначним в оптичній фізиці. 180 років учені пояснювали обертання поляризації світла в магнітному полі виключно взаємодією електричного поля світла з електричними зарядами всередині матеріалу [1,2].

Але нове дослідження показує, що магнітне поле світла, яке тривалий час вважалося несуттєвим, робить прямий і вимірний внесок в ефект Фарадея [1,2].

У результаті вчені отримали перший доказ того, що магнітне поле світла безпосередньо взаємодіє з матеріалом, діючи подібно до статичного магнітного поля. Дослідження показало, що магнітна складова світла виступає в якості основи взаємодії з матеріалом, особливо на великих довжинах хвиль світла [1,2].

За словами фізиків, це взаємодія світла і магнетизму. Статичне магнітне поле "закручує" світло, а світло, своєю чергою, проявляє магнітні властивості матеріалу. Вчені виявили, що магнітна складова світла надає ефект першого порядку [1,2].

Це дослідження відкриває нові шляхи для досліджень у галузі оптики і магнетизму, а також для створення нових технологій.

Тому, наразі досить актуальними є дослідження властивостей магнітних полів за допомогою оптичних методів.

1. Оптичні методи вимірювання параметрів магнітного поля

1.1 Магнітооптичні ефекти

1.1.1 Загальна характеристика

Прояви магнітооптичних ефектів визначаються залежно від напрямку поширення світла відносно орієнтації намагніченості, методу їх спостереження — у пропощеному через речовну чи відбитому світлі. Фарадея явище (ефект) — поворот площини поляризації лінійно поляризованого світла при поширенні його в речовині вздовж напрямку магнітітного поля. Кут повороту φ прямо пропорційний шляху L променя та індукції B магнітного поля $\varphi = \alpha LB$. Константа α залежить від природи речовини та частоти світла — обертальна дисперсія. Лінійно поляризоване випромінювання можна уявити як суперпозицію 2-х право- і лівоциркулярнополяризовануз хвиль, що поширюються в одному напрямку та мають протилежний напрямок обертання електричного вектора світлової хвилі навколо напрямку поширення хвилі. З феноменологічного погляду ефект Фарадея пояснюється різною швидкості поширення цих хвиль у намагніченій речовині. Ці хвилі набувають різниці ходу, що лінійно залежить від довжини шляху, і, складаючись, утворюють результуючу лінійно поляризовану хвилю із електричним вектором, що повернутий відносно напрямку поширення хвилі на деякий кут [2-6].

1.1.2 Ефект Коттона–Мутона

Ефект Коттона–Мутона — поява анізотропії та відповідно подвійного променезаломлення в ізотропних речовинах при поміщенні їх у сильне

однорідне магнітне поле. Вектор індукції магнітного поля має бути напрямлений перпендикулярно напрямку поширення світлової хвилі. Молекули середовища повинні бути анізотропними та мати постійний магнітий момент. Різниця фаз звичайного (о) і незвичайного (е) променів визначається різницею показників їхнього заломлення no і ne та довжиною шляху L світла в речовині й залежить від напруженості магнітного поля H: Δ = L(ne— no)/λ = cLH2. Стала с всіх речовин різна і залежить від довжини світлової хвилі та температури. Коттона–Мутона ефект слабкий, зокрема для нітробензолу в магнітному полі з індукцією B = 20000 Гс на довжині шляху L = 10 см виникає різниця фаз всього Δ = 3,2°. Коттона–Мутона ефект пояснюється переважаючою орієнтацією молекул з анізотропною поляризованістю, викликаною зовнішнім магнітним полем. Крім того, змінюється також і сама поляризованість молекул. У результаті середовище під дією магнітного поля веде себе подібно одновісному кристалу, оптична вісь якого паралельна індукції магнітного поля B. Тепловий рух молекул чинить розорієнтаційну дію на орієнтацію молекул. Тому з підвищенням температури вплив дезорієнтації молекул збільшується і коефіцієнт с зменшується, внаслідок чого величина різниці фаз, наведена магнітним полем, зменшується [2-6].

1.1.3 Магнітооптичний ефект Керра

Магнітооптичний ефект Керра— зміна стану поляризації світлової хвилі при її відбиванні від плоскої поверхні намагніченої речовини. Характер і ступінь змін поляризації залежать від взаємного розташування поверхні зразка, площини поляризації надходження світла та вектора намагніченості B. Полярний ефект Керра полягає в тому, що при відбиванні лінійно поляризованого світла від поверхні намагніченого матеріалу спостерігається обертання площини поляризації світла навколо напрямку променя.

Найбільший ефект спостерігається при нормальному падінні світла. При меридіональному (поздовжньому) ефекті Керра вектор намагніченості лежить у площині відбиваючої поверхні та паралельний площині падіння світла. Найбільший ефект спостерігається при великих кутах падіння, при нормальному падінні взагалі не відбувається. Екваторіальний (поперечний) ефект Керра проявляється при перпендикулярній орієнтації вектора індукції магнітного поля до площини падіння. Можливий тільки для компоненти поляризації, нормальної до намагніченості (p-компоненти), і дорівнює нулю для світла, поляризованого паралельно намагніченості (s-компоненти). Є ефектом першого порядку за намагніченістю. Його прояв полягає в зміні коефіцієнта відбиття під дією намагніченості і, як наслідок, у зміні інтенсивності світла та зсуві фази лінійно-поляризованого світла. Поперечний ефект може проявлятися тільки для поглинаючих матеріалів, тобто для матеріалів з ненульовою компонентою комплексної частини тензора діелектричної проникності. Для дійсної частини тензора діелектричної проникності та для s-компоненти поляризації світла може спостерігатися лише більш слабкий квадратичний за намагніченістю ефект [2-6].

1.1.4 Ефе́кт Фарадея́

Ефе́кт Фарадея́ (рисунок 1.1) полягає у виникненні оптичної активності в середовищі під дією магнітного поля. При поширенні світла в оптично ізотропному середовищі або в напрямку оптичної осі кристалу і прикладанні магнітного поля вздовж напрямку поширення світла, ефект Фарадея проявляється у повертанні площини поляризації світла на кут, який лінійно залежить від напруженості магнітного поля. Знак повертання площини поляризації світла при ефекті Фарадея не залежить від знака хвильового вектора [2-6].

Ефект Фарадея пояснюється тим, що оптичні властивості намагніченої речовини не можна характеризувати одним показником заломлення n. Під дією магнітного поля показники заломлення n_+ і n_- для циркулярно право- і лівополяризованого світла стають різними. Внаслідок цього право- і лівополяризовані складові лінійно поляризованого світла поширюються уздовж магнітного поля через речовину з різними фазовими швидкостями. Виникає різниця ходу, лінійно залежна від довжини шляху. В результаті площина поляризації монохроматичного світла з довжиною хвилі λ, що пройшло у середовищі шлях l, повертається на кут[2-6]:

$$\Theta = \frac{\pi * l(n_+ - n_-)}{\lambda}, \qquad (1.1)$$

У слабких магнітних полях різниця $(n_+ - n_-)$ лінійно залежить від напруженості поля H і кут фарадеєвого обертання описується формулою[2-6]:

$$\Theta = vHl, \qquad (1.2)$$

де, υ - стала Верде, залежить від довжини світлової хвилі, властивостей речовини і її температури.

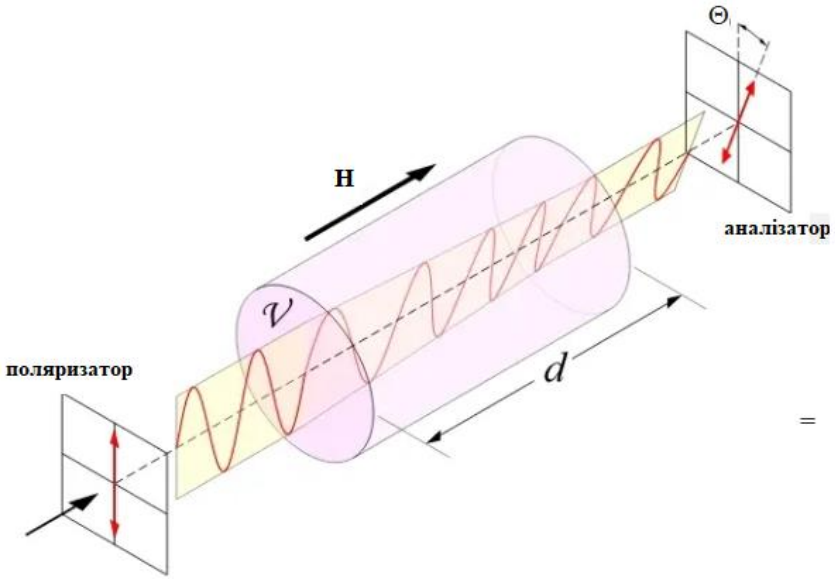


Рисунок 1.1 - Схематичне зображення обертання площини поляризації в магнітному полі: H – напруженість магнітного поля, d – оптичний шлях у середовищі, υ - стала Верде [2-6].

Створення лазерів призвело до прояву нових магнітооптичих ефектів, що спостерігаються при великих інтенсивностях світлового потоку. Зокрема, циркулярнополяризоване світло, проходячи через прозоре середовище, діє як ефективне магнітне поле та намагнічує його (обернений ефект Фарадея). Магнітооптичні ефекти відбуваються перш за все у магнітоупорядкованих середовищах (металах і діелектриках). При взаємодії світла з магнітоупорядкованим середовищем головну роль відіграють внутрішні магнітні поля цих середовищ, які можуть досягати 10^5–10^6 Ерстед і визначають спонтанну намагніченість у кристалі. Більшість магнітооптичних ефектів є прямим або непрямим наслідком розщеплення рівнів енергії (ефект Зеємана) і зв’язані з особливостями поляризації оптичних переходів та із закономірностями поширення світла в середовищі, що має дисперсію речовини. Магнітооптичні властивості прозорих феритів і антиферомагнетиків використовують у системах управління лазерним променем для створення модуляторів світла, для оптичного запису та

зчитування інформації в електронно-обчислювальній техніці. У науці за допомогою магнітооптичних ефектів досліджують квантові стани, фізико-хімічну структуру речовини, електронну структуру металів і напівпровідників, фазові переходи тощо [7-9].

Як було показано у роботі [2], перспективними ефективними інструментами дослідження магнітного поля можуть стати оптоволоконні сенсорні системи (оптоволоконні датчики).

1.2 Оптоволоконні датчики

У розвитку радіотехніки з самого початку XX століття постійно простежувалася тенденція освоєння електромагнітних хвиль все більш високої частоти. Важливим моментом в розвитку оптоелектроніки є створення оптичних волокон. Особливо інтенсивними дослідження стали в кінці 1960-х років, а розробка в 1970 р. американською фірмою "Корнінг" кварцового волокна з малим загасанням (20 дБ/км) з'явилася епохальною подією і послужила стимулом для збільшення темпів досліджень і розробок на всі 1970-ті роки [10, 11].

Оптичне волокно буває одного з двох типів: одномодове, в якому розповсюджується тільки одна мода (тип розподілу передаваного електромагнітного поля), і багатомодове — з передачею безлічі (близько сотні) мод. Конструктивно ці типи волокон розрізняються тільки діаметром осердя — світлопровідній частині, усередині якої коефіцієнт заломлення трохи вищий, ніж в периферійній частині — оболонці. У медичній техніці використовуються як багатомодові, так і одномодові оптичні волокна. Багатомодові волокна мають великий (приблизно 50 мкм) діаметр осердя, що полегшує їх з'єднання один з одним. Але оскільки групова швидкість світла для кожної моди різна, то при передачі вузького світлового імпульсу відбувається його розширення (збільшення дисперсії). В порівнянні з

багатомодовими у одномодових волокон переваги і недоліки міняються місцями: дисперсія зменшується, але малий (5...10 мкм) діаметр осердя значно утруднює з'єднання волокон цього типу і введення в них світлового променя лазера [10, 11].

Внаслідок цього одномодові оптичні волокна знайшли переважне застосування в лініях зв'язку, що вимагають високої швидкості передачі інформації (лінії верхнього рангу в ієрархічній структурі ліній зв'язку), а багатомодові найчастіше використовуються в лініях зв'язку з порівняно невисокою швидкістю передачі інформації. Є так звані когерентні волоконно-оптичні лінії зв'язку, де придатні тільки одномодові волокна. У багатомодовому оптичному волокні когерентність світлових хвиль, що приймаються, падає, тому його використання в когерентних лініях зв'язку непрактичне, що і зумовило застосування в подібних лініях тільки одномодових оптичних волокон. Навпаки, хоча при використовуванні оптичних волокон для датчиків вищезгадані чинники теж мають місце, але у багатьох випадках їх роль вже інша. Зокрема, при використовуванні оптичних волокон для когерентних вимірювань, коли з цих волокон формується інтерферометр, важливою перевагою одномодових волокон є можливість передачі інформації про фазу оптичної хвилі, що нездійсненно за допомогою багатомодових волокон. Отже, в даному випадку необхідне тільки одномодове оптичне волокно, як і в когерентних лініях зв'язку. Проте, на практиці застосування одномодового оптичного волокна при вимірюванні нетипове через невелику його дисперсію. Коротше кажучи, в сенсорній оптоелектроніці, за винятком датчиків-інтерферометрів, використовуються багатомодові оптичні волокна. Ця обставина пояснюється ще і тим, що в датчиках довжина використовуваних оптичних волокон значно менша, ніж в системах оптичного зв'язку [10, 11].

Необхідно відзначити загальні переваги оптичних волокон:

- широкосмугова (передбачається до декількох десятків терагерц);
- малі втрати (мінімальні 0,154 дБ/км);

- малий (близько 125 мкм) діаметр;
- мала (приблизно 30 г/км) маса;
- еластичність (мінімальний радіус вигину 2 мм);
- механічна міцність (витримує навантаження на розрив приблизно 7 кг);
- відсутність взаємної інтерференції (перехресних перешкод типу відомих в телефонії "перехідних розмов");
- безіндукційність (практично відсутній вплив електромагнітної індукції, а отже, і негативні явища, пов'язані з грозовими розрядами, близькістю до лінії електропередачі, імпульсами струму в силовій мережі);
- вибухобезпечність (гарантується абсолютною нездатністю волокна бути причиною іскри);
- висока електроізоляційна міцність (наприклад, волокно завдовжки 20 см витримує напругу до 10000 В);
- висока корозійна стійкість, особливо до хімічних розчинників, масел, води [10, 11].

У практиці використовування волоконно-оптичних датчиків мають найбільше значення останні чотири властивості. Достатньо корисні і такі властивості, як еластичність, малі діаметр і маса. Широкосмуговість же і малі втрати значно підвищують можливості оптичних волокон, але далеко не завжди ці переваги усвідомлюються розробниками датчиків. Проте, з сучасної точки зору, у міру розширення функціональних можливостей волоконно-оптичних датчиків в найближчому майбутньому ця ситуація потроху виправиться [10, 11].

У волоконно-оптичних датчиках оптичне волокно може бути застосоване просто як лінія передачі, а може грати роль найчутливішого елементу датчика. У останньому випадку використовуються чутливість волокна до електричного поля (ефект Керра), магнітного поля (ефект

Фарадея), до вібрації, температури, тиску, деформацій (наприклад, до вигину). Багато з цих ефектів в оптичних системах зв'язку оцінюється як недоліки, в датчиках же їх поява вважається швидше перевагою, яку слід розвивати і використовувати [10, 11].

Сучасні волоконно-оптичні датчики дозволяють вимірювати майже все. Наприклад, тиск, температуру, відстань, положення в просторі, швидкість обертання, швидкість лінійного переміщення, прискорення, коливання, масу, звукові хвилі, рівень рідини, деформацію, коефіцієнт заломлення, електричне поле, електричний струм, магнітне поле, концентрацію газу, дозу радіаційного випромінювання, на використовуванні пучків таких волокон ґрунтується вся техніка ендоскопії [10, 11].

Якщо класифікувати волоконно-оптичні датчики з погляду застосування в них оптичного волокна, то, їх можна грубо розділити на датчики, в яких оптичне волокно використовується як лінія передачі, і датчики, в яких воно використовується як чутливий елемент. У датчиках типу "лінії передачі" використовуються в основному багатомодові оптичні волокна, а в датчиках сенсорного типу найчастіше — одномодові.

За допомогою волоконно-оптичних датчиків з оптоволокном як лінія передач можна вимірювати наступні фізичні величини [10, 11]:

датчиком прохідного типу (рисунок 1.2): температуру (на основі вимірювання зміни постійної люмінесценції в багатомодових волокнах, в діапазоні 0...70°С із точністю ± 0,04° С);

датчиком відбивного типу (рисунок 1.3): концентрацію кисню в крові (відбувається зміна спектральної характеристики, детектує інтенсивність відображеного світла, оптоволокно – пучкове, з доступом через катетер).

Якщо ж оптичне волокно в датчику використовувати як чутливий елемент, то можливі наступні застосування:

інтерферометр Майкельсона дозволяє вимірювати пульс, швидкість кровотоку: використовуючи ефект Доплера можемо детектувати частоту

биття – використовуються як одномодове, так і багатомодове волокна; діапазон вимірювань: 10-4…108 м/с.

на основі неінтерферометричної структури можливо побудувати датчик, що дозволяє визначати дозу іонізуючого випромінювання, використовуване фізичне явища – формування центру фарбування, величина, що детектує, – інтенсивність світла, що пропускається.

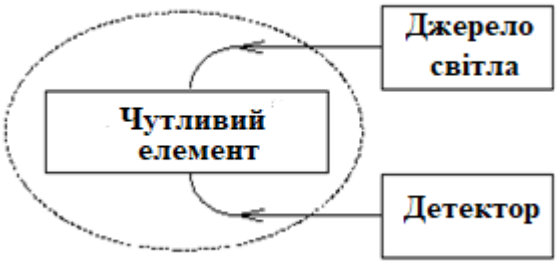


Рисунок 1.2 - Волоконно-оптичний датчик прохідного типу[10, 11]

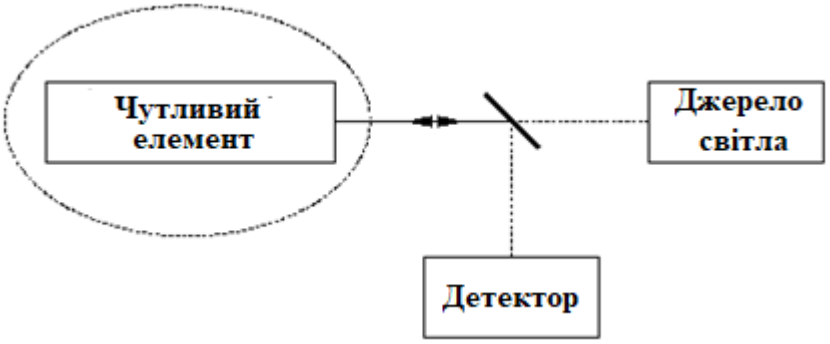


Рисунок 1.3 - Волоконно-оптичний датчик відбивного типу[10, 11]

Основними елементами волоконно-оптичного датчика, є: оптичне волокно, світловипромінюючий (джерело світла) і світлопоглинаючий пристрої, оптичний чутливий елемент. Крім того, спеціальні лінії необхідні для зв'язку між цими елементами або для формування вимірювальної системи з датчиком. Далі, для практичного впровадження волоконно-оптичних датчиків необхідні елементи системної техніки, які в сукупності з вищезгаданими елементами і лінією зв'язку утворюють вимірювальну систему [10, 11].

1.3 Оптоволоконний датчик вимірювання магнітного поля на основі ефекта Фарадея

На рисунку 1.4 представлена типова схема датчика вимірювання магнітного поля на основі ефекта Фарадея [10, 11].

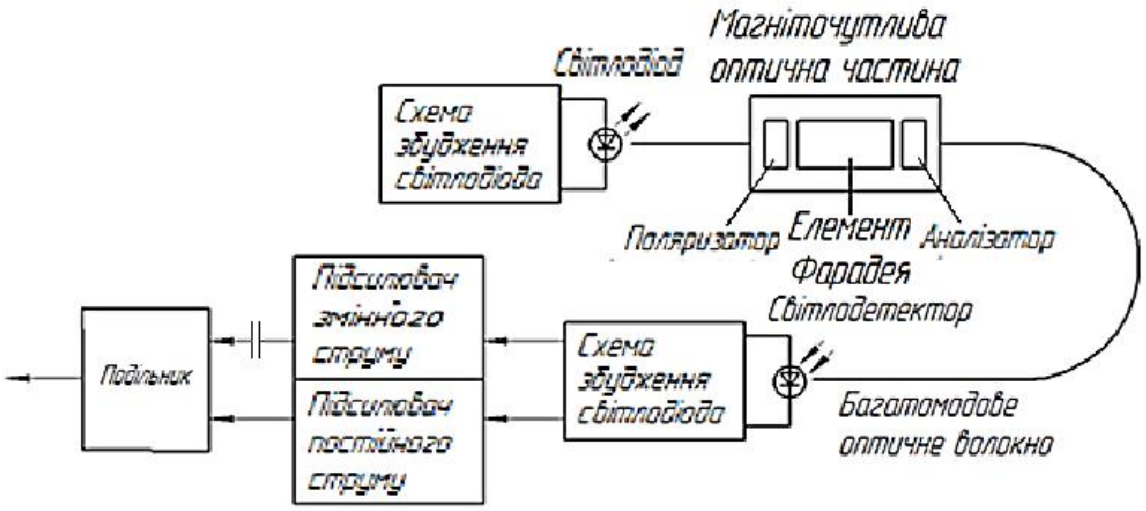


Рисунок 1.4 - Схема датчика вимірювання магнітного поля на основі ефекта Фарадея

На рисунку 1.5 представлена оптична частина чутливого елемента датчика [10, 11].

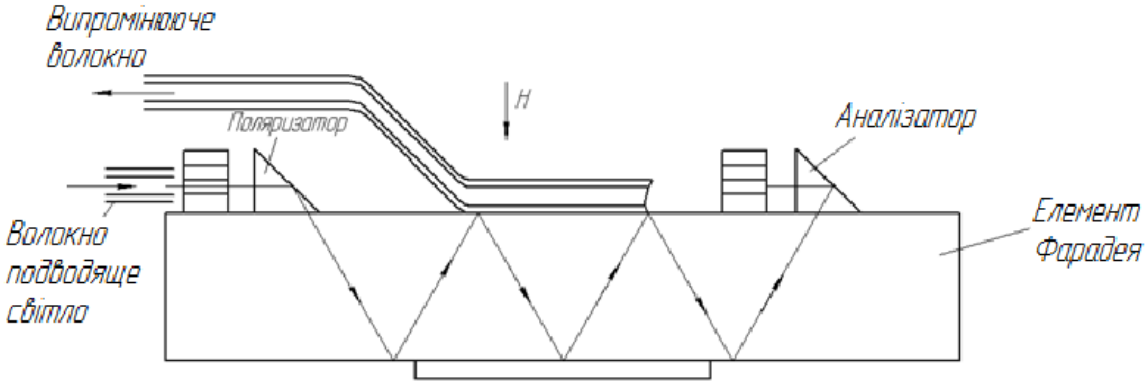


Рисунок 1.5 - оптична частина чутливого елемента датчика вимірювання магнітного поля на основі ефекта Фарадея

В датчику обертання Фарадея відбувається разом з багаторазовим відбиттям світлового променя, що входить в свинцеве скло При цьому промінь, відбиваючись від верхньої і нижньої поверхні скла, не змінює поляризацію. Для більш повного відбиття на ці поверхні напилюється багатошарова плівка з властивостями четвертьхвильової пластини. Одна з переваг такого датчика – подовження дійсного оптичного шляху, а отже, і збільшення глибини модуляції інтенсивності магнітним полем. При використанні для передачі і прийому світла багатомодового оптичного волокна, або джгута з оптичних волокон, а в якості джерела світла світлодіода на основі AlGaAs мінімальна вимірювана напруженість магнітного поля 400 А/м, діапазон вимірювань 0–40000 А/м (0–500 Е), лінійність ± 1%. Нерівномірність частотної характеристики ± 3 дБ в смузі частот від 3 до 750 Гц [10, 11].

Схема оптичної частини магнітного датчика з об'єднанням оптичних елементів показана на рисунку 1.6. В оптичній частині датчику в якості матеріалу для елемента Фарадея використовується свинцеве скло. На склі безпосередньо виготовляється поляризатор і аналізатор багатошарового типу (діелектричні плівки SiO_2/TiO_2). Завдяки конструктивного об'єднання цих елементів підвищується надійність датчика і знижується його собівартість [10, 11].

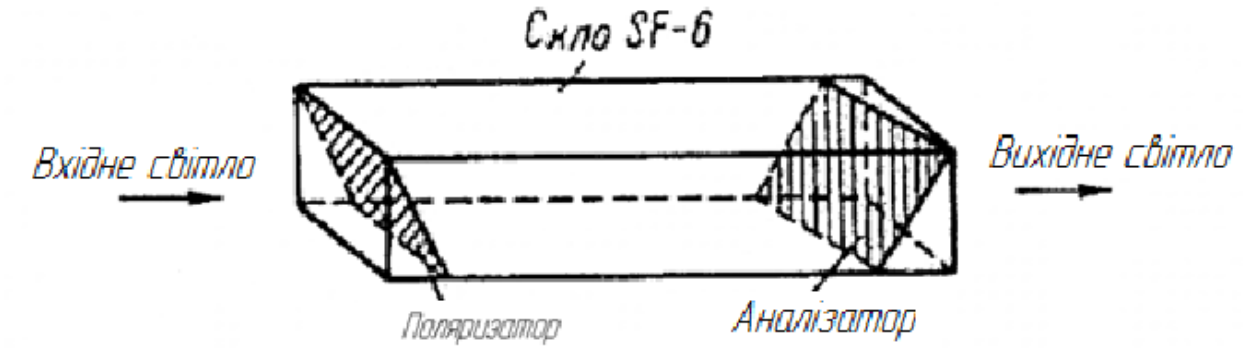


Рисунок 1.6 - Схема оптичної частини магнітного датчика з об'єднанням оптичних елементів

Як джерело світла використовується світлодіод (λ = 0,85 мкм), в якості світлового детектора використовується pin-фотодіод. Оптичне волокно багатомодовое з кварцового скла з діаметром осердя 100 мкм. Датчик з довжиною оптичного шляху 20 мм дозволяє вимірювати напруженість магнітного поля 80–4000 А/м (10–500 Е) з нелінійністю не гірше ± 0,25 % і при відношенні сигнал-шум не менше 40 дБ. Температурна похибка ± 0,5 % в діапазоні від – 25 до 86 °С [10, 11].

Отже, за матеріалами розділу можна зробити наступні висновки:

1) дослідження останніх років показали можливість використання світла у вимірювачах параметрів магнітного поля;

2) перспективними ефективними інструментами дослідження магнітного поля можуть стати оптоволоконні сенсорні системи (оптоволоконні датчики);

3) існуючі оптоволоконні системи вимірювання параметрів магнітного поля на основі магнітооптичних ефектів (ефект Фарадея) мають досить складну оптичну та схемотехнічну складові.

Тому, темою дипломної роботи є розробка оптоволоконного датчика магнітного поля.

Для досягнення мети у роботі потрібно виконати такі завдавння:

1) на підставі аналізу існуючих систем обрати ефективну оптоволоконну схему датчика магнітного поля;

2) розробити структурну схему пристрою;

3) провести моделювання основних функціональних блоків пристрою за допомогою САПР електронних схем;

4) розробити заходи із норм дотримання умов безпеки праці та техногенної безпеки.

2. Розробка оптоволоконного датчика магнітного поля

2.1 Структурна схема оптоволоконного датчика магнітного поля

На рисунку 2.1 представлена структурна схема датчика.

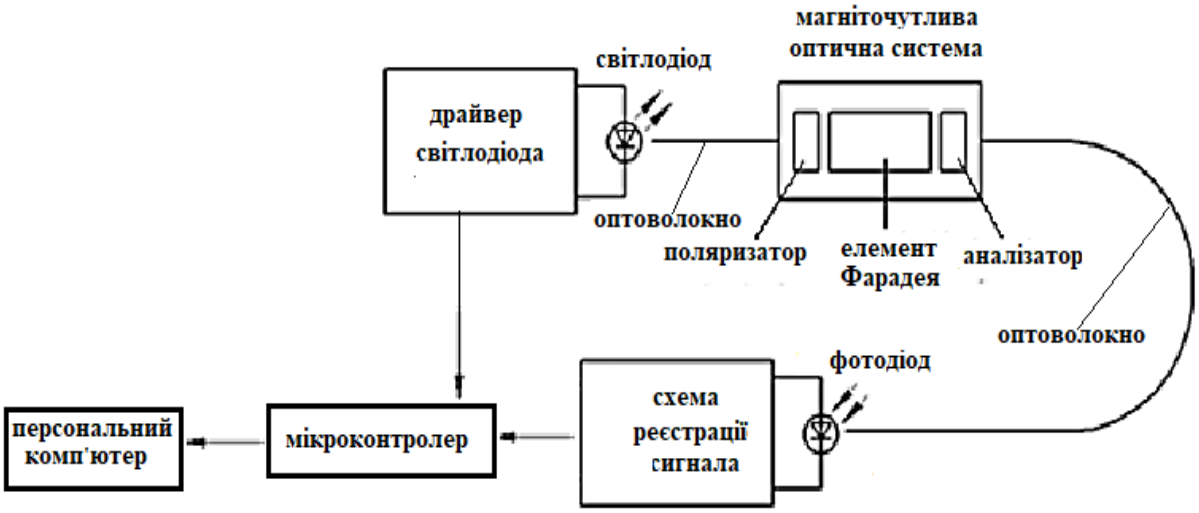


Рисунок 2.1 – Структурна схема оптоволоконного датчика магнітного поля

Схема складається із джерела світла – інфрачервоного (ІЧ) світлодіода з драйвером, оптичного вкварцевого волокна, магніточутливої системи, яка безпосередньо розміщується в магнітному полі, фотореєструючої ситеми, мікроконтролера керуванняпараметрами світлодіода та реєструючої системи, персонального комп’ютера для здійснення автоматизованого контролю функціюванням датчика.

Особливістю датчика є магніточутлива система, яка містить волокно для підвода світлового потока, елемент Фарадея, аналізатор і поляризатор виготовлені в одному блоці. Схема магніточутливої системи представлена на рисунку 2.2.

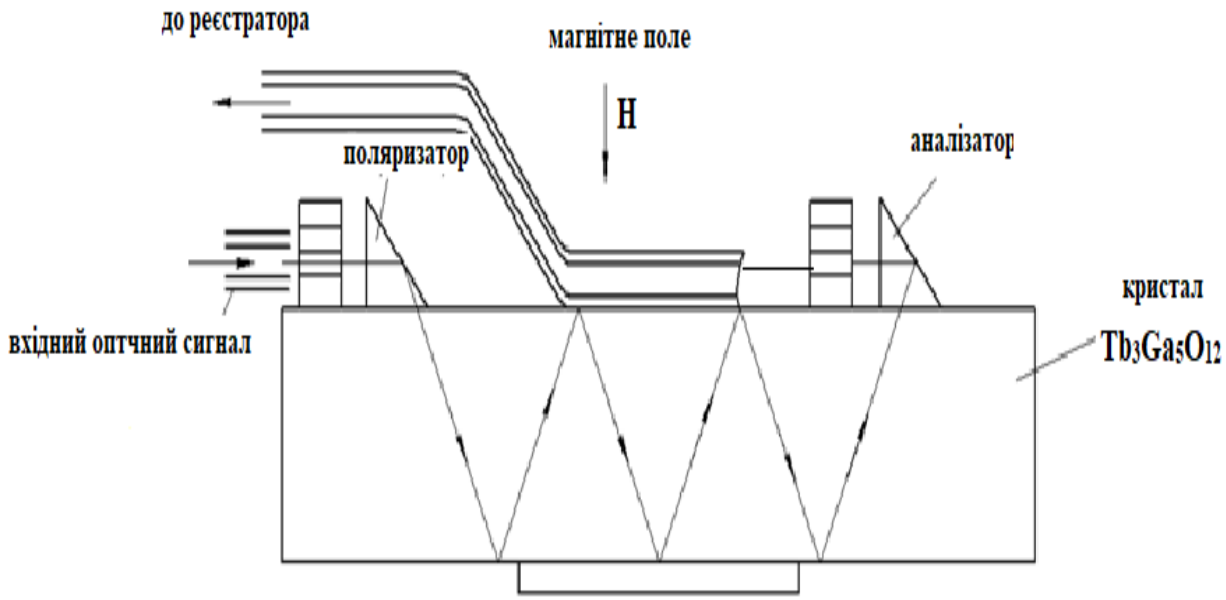


Рисунок 2.2 - Схема магніточутливої системи

У якості елемента Фарадея використовуємо тербій-галієвий гранат (TGG, $Tb_3Ga_5O_{12}$) — це синтетичний магнітооптичний кристал, який є основним матеріалом для фарадеївських обертачів та оптичних ізоляторів. Завдяки високій магнітооптичній сталій, низьким оптичним втратам та високій теплопровідності, TGG ефективно використовується в лазерних системах діапазону 400–1100 нм [1, 2, 12].

Основні кристалофізичні параметри $Tb_3Ga_5O_{12}$ представлнні в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Основні кристалофізичні параметри $Tb_3Ga_5O_{12}$

Параметр	Значення параметру
Хімічна формула	$Tb_3Ga_5O_{12}$
Кристалічна структура	Кубічний
Константа решітки	12.355A°
Точка плавлення	1725 °C
Щільність, г/см3	7.13
Твердість Мооса	8.0
Магнітооптична константа	35 Рад
Втрата передачі	< 0.1%/см
Теплопровідність	7.4 Вт/м·К
Порогове значення лазерного пошкодження	>1 ГВт/см^2
Показник заломлення	1.954 (1064 нм) 1.97 (850 нм)
Область прозорості	400 – 1100 нм

В TGG склі обертання Фарадея відбувається разом з багаторазовим відбиттям світлового променя, що входить в кристал. При цьому промінь, відбиваючись від верхньої і нижньої поверхні скла, не змінює поляризацію. Для більш повного відбиття на ці поверхні напилюється багатошарова плівка з властивостями четвертьхвильової пластини [10, 11].

Згідно із значенням показника заломлення TGG на довжині хвилі випромінювання 800 - 900 нм (перше вікно прозорості кварцевого оптоволокна, яке співпадає із довжиною хвилі випромінювання AlGaAs

світлодіода), у якості поляризатора і аналізатора обираємо кварцеві призми із нанесеним поляризуючим покриттям - діелектричні плівки SiO_2/TiO_2 [10, 11]

У місці контакту плівки з призмою відбувається порушення повного внутрішнього відбивання (ПВВ), що поширюється з призми у плівку (рисунок 2.3) [10].

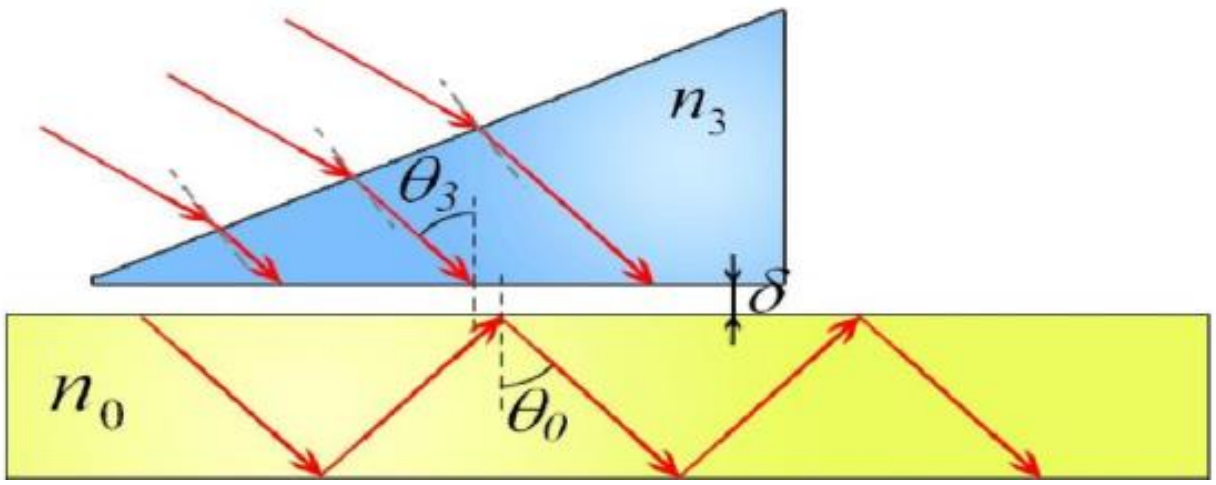


Рисунок 2.3 – Схема введення випромінювання у кристал $Tb_3Ga_5O_{12}$

Із закону Снелліуса легко знайти кут Θ_3 [10]:

$$\sin\Theta_3 = \frac{n_0}{n_3}\sin\Theta_0 \qquad (2.1)$$

де, n_0 – показник заломлення TGG , n_3 – показник заломлення кварцу (при 850 нм n=1,45), δ - зазор між призмою і елементом Фарадея.

Зазвичай застосовують призми з $n_3>n_0$, так як $\sin\theta_0$ може бути близький до одиниці. Зв'язок між світловими полями в призмі і плівці здійснюється за рахунок проникнення в плівку експоненціально спадаючих полів, що мають місце при ПВВ (часто це явище називають тунелюванням, а таке введення – тунельним) [10].

Одна з переваг такого датчика – подовження дійсного оптичного шляху, а отже, і збільшення глибини модуляції інтенсивності магнітним полем. При використанні для передачі і прийому світла багатомодового оптичного волокна, або джгута з оптичних волокон, а в якості джерела світла світлодіода на основі AlGaAs мінімальна вимірювана напруженість

магнітного поля 400 А/м, діапазон вимірювань 0–40 000 А/м (0–500 Е), лінійність ± 1%. Нерівномірність частотної характеристики ± 3 дБ в смузі частот від 3 до 750 Гц [10,11].

2.2 Світловипромінююча система датчика магнітного поля

2.2.1 Оптоволокно датчика магнітного поля

Для забезпечення стабільного функціювання датчика у якості джерела випромінювання обираємо лазерний світлодіод на основі AlGaAs, так як довжина хвилі випромінювання таких світлодіодів складає 750 - 890 нм [10]. Довжина хвилі випромінювання співпадає із вікном прозорості кварцевого волокна (рисунок 2.4) [13], та із прозорістю кристала TGG (400 – 1100 нм) [12].

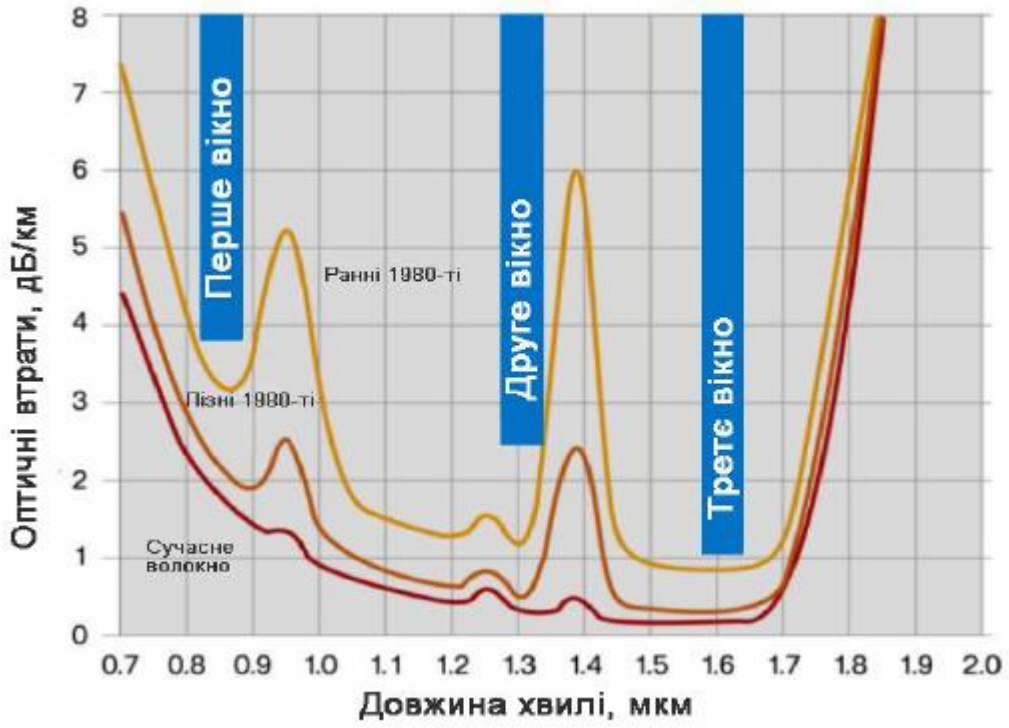


Рисунок 2.4 – Прозорість кварцевого оптоволокна

Отже, для забезпечення проходження випромінювання у датчику використовуємо кварцеве волокно із відповідним вікном прозорості.

У якості оптоволокна був обраний оптоволоконний кабель спеціального призначення української компанії «Оптокон» [14]. Була обрана модель кабеля діаметром 5,1 мм із двома волокнами. Конфігурація зображена на рисунку 2.5 [14].

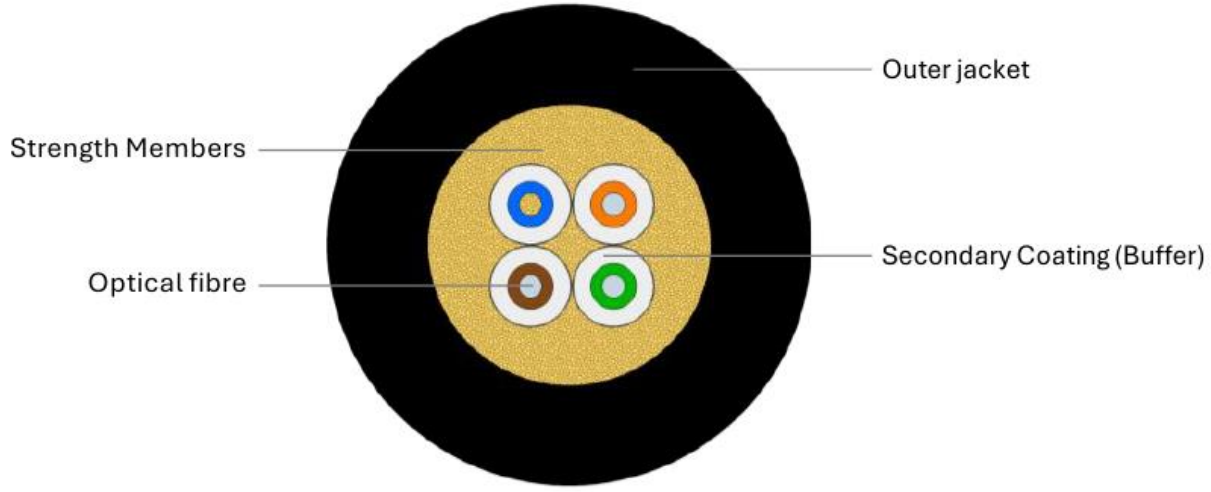


Рисунок 2.5 – Оптоволоконний кабель для датчика магнітного поля

Основні переваги кабеля:

- Тактичний дизайн: легкий, компактний і гнучкий
- Стійкість до стирання та механічних впливів
- TPU-оболонка: вогнестійкість (V-0), UV-захист, висока еластичність
- Водонабухаючі арамідні нитки – захист від проникнення вологи
- Призначений для багаторазового перемотування та мобільного використання
- Працює в діапазоні температур −40…+85°C
- Доступний у конфігураціях від 2 до 12 волокон
- Підтримка всіх популярних волокон: G.657.A1/A2/B3, OM1–OM5 [14].

2.2.2 Джерело випромінювання

Як було зазначено вище, у якості джерела світла використовуємо AlGaAs світлодіод із довжиною хвилі випромінювання 750 - 890 нм [10].

Довжина хвилі випромінювання лазерного діода залежить від температури напівпровідникового кристала: чим вища температура, тим більша довжина хвилі. Джоулеве тепло, яке виділяється під час протікання через діод струму, нагріває кристал, його показник заломлення трохи зменшується, змінюючи при цьому оптичну довжину резонатора. У разі незначного підвищення температури кристала довжина хвилі генерованої моди хоча і зростає лінійно з температурою, але умова резонансу продовжує частково виконуватися для цієї моди; якщо температура підвищується більше, умова резонансу починає краще виконуватися для іншої моди і відбувається перескок моди – різкий перехід до генерації на іншій довжині хвилі, яка відрізняється від попередньої на 0,3–0,5 нм (рисунок 2.6) [15].

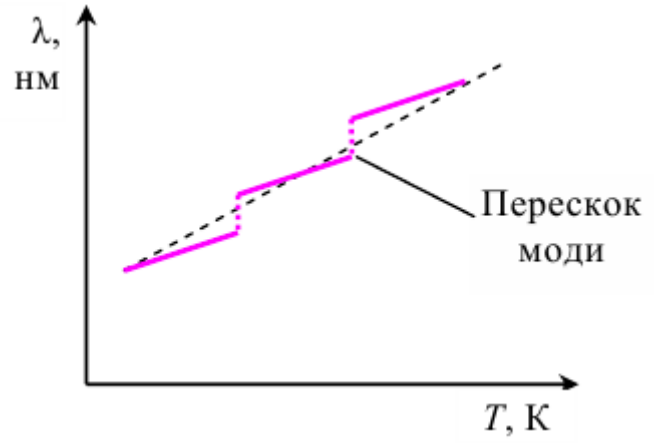


Рисунок 2.6 - Температурна залежність довжини хвилі випромінювання лазерного діода

Найбільш вживаним і простим методом стабілізації частоти лазерного діода є керування струмом інжекції. Якщо для цього використати випромінювання, яке виходить через заднє дзеркало лазера, і за допомогою фотоприймача та підсилювача замкнути зворотний зв’язок на джерело

живлення лазера, то ефективність стабілізації підвищується і стабільність частоти сягає 10^{-12} (рисунок 2.7) [15].

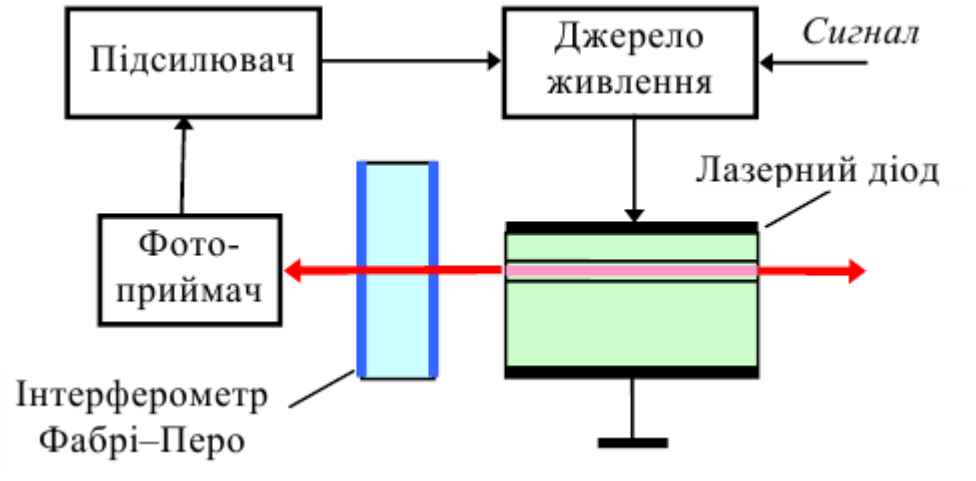


Рисунок 2.7 - Схема стабілізації частоти випромінювання лазерного діода

У процесі з'єднання лазерного діода із оптичним волокном, основні проблеми включають низьку ефективність, невідповідність режимів і надзвичайно високі вимоги до точності. Ці обмеження впливають на стабільність і якість сигналу лазерної передачі, що ускладнює досягнення оптимальної продуктивності у високоточних оптичних комунікаціях і точних оптичних системах [10,16].

Використання технології волоконно-зв'язаного лазерного діоду із оптоволокном може значно підвищити ефективність зв'язку та стабільність сигналу. Ця технологія має широкі перспективи застосування та сприяє швидкому розвитку суміжних технологій та галузей [16].

Одномодові волоконно-зв'язані лазерні діоди забезпечують ефективний, стабільний односпрямований вихід поляризованого променя через спеціально розроблені оптичні волокна та пакети лазерних діодів для адаптації до прикладних сценаріїв із суворими вимогами до стану поляризації світла. На рисунку 2.8 представлений такий пристрій китайської компанії JTBYShield Laser Technology [16].

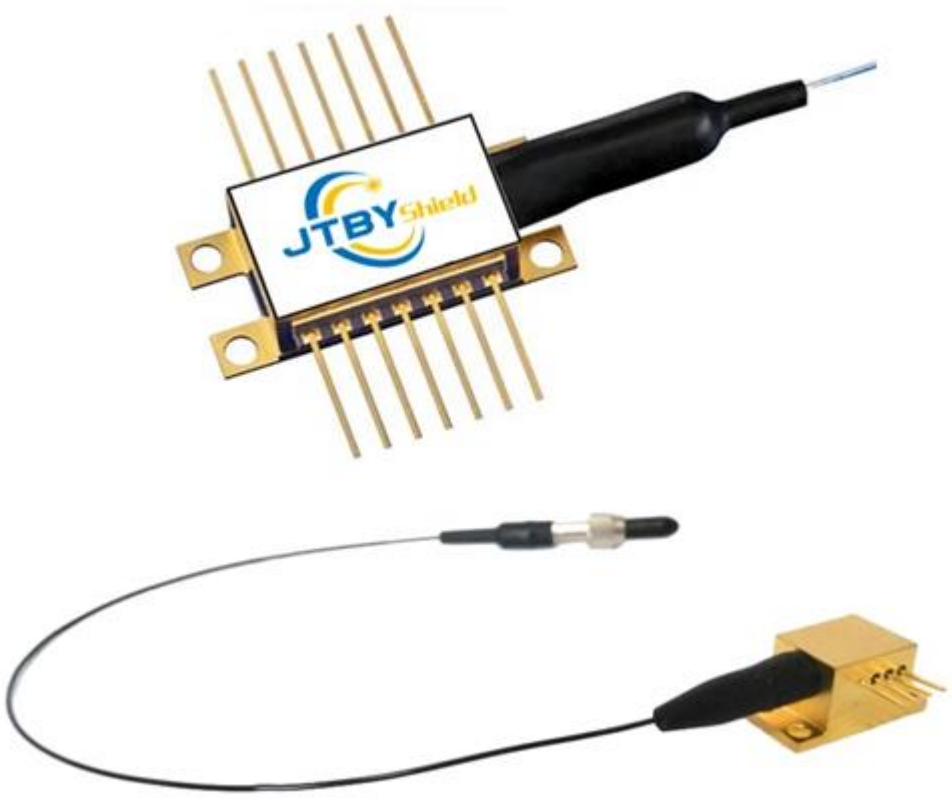


Рисунок 2.8 - Волоконно-зв’язаний лазерний діод компанії JTBYShield Laser Technology

Принцип роботи:

Розмір серцевини: діаметр серцевини цього оптичного волокна зазвичай становить лише кілька мікрон, наприклад 6 мкм (для довжини хвилі 1 мкм) або 9 мкм (для довжини хвилі 1,5 мкм). Умови одномодового передачі: Робота одномодового волокна базується на його довжині хвилі зрізу. Волокно може підтримувати одномодову передачу лише тоді, коли береться до уваги довжина хвилі між його граничною довжиною хвилі та приблизно в 1,5 рази більше граничної довжини хвилі.

Підтримка стану поляризації світла: волокно, що підтримує поляризацію, може підтримувати стан поляризації світлових хвиль по всій довжині волокна за допомогою спеціальної конструкції оболонки. Зменшення впливу PMD: два ортогональні напрямки поляризації цього волокна створюють різні показники заломлення через асиметричну

структуру, таким чином зберігаючи напрямок поляризації світла та значно зменшуючи дисперсію мод.

Перетворення електричної енергії в лазерну енергію: лазерні діоди використовують напівпровідникові матеріали, такі як GaAs і InP.

Ефективність зчеплення: ефективність зчеплення є важливим показником для оцінки якості зчеплення. Це залежить від числової апертури волокна, якості променя лазерного діода та ступеня узгодження між ними [16].

Проблема узгодження режиму: оскільки промінь, випромінюваний лазерним діодом, часто є нерівномірним і розбіжним, його складно безпосередньо з'єднати в одномодове волокно з невеликою серцевиною, що вимагає точної оптичної системи для формування променя.

Інтегрована конструкція: цей тип лазерного діода зазвичай використовує пакет «метелик», який містить охолоджувач TEC і термістор для підтримки стабільної робочої температури та вихідної потужності На рисунку 2.9 представлені геометричні параметри волоконно-зв'язаного лазерного діода компанії JTBYShield Laser Technology [16].

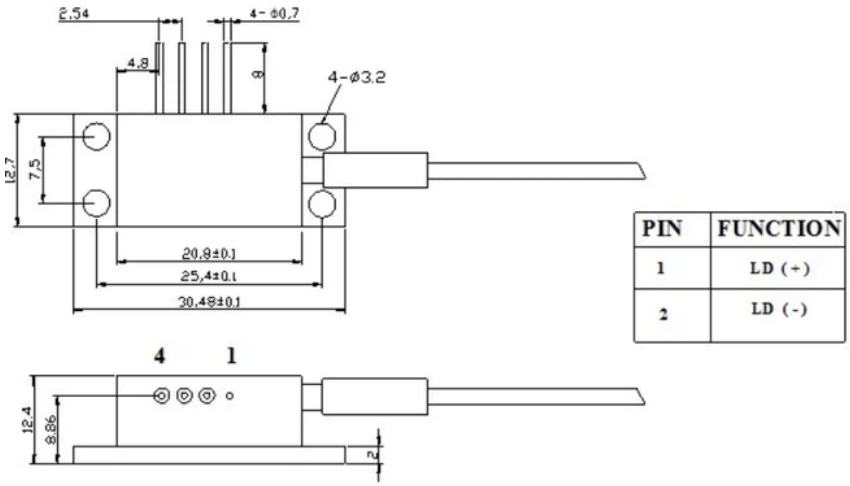


Рисунок 2.9 - Геометричні параметри волоконно-зв'язаного лазерного діода компанії JTBYShield Laser Technology

У таблиці 2.2 представлені характеристики волоконно-зв'язаного лазерного діода [16].

Таблиця 2.2 Характеристики волоконно-зв’язаного лазерного діода

.

Центральна довжина хвилі	808 нм±10 нм при 25 градусів
потужність	2W
Тип волокна	Багатомодове волокно
Діаметр сердечника волокна	105 мкм
Числова апертура	0.22N.A.
Довжина волокна	60см±10см
Оптоволоконний інтерфейс	SMA905
Фотодіод	Так

Незважаючи на потужні функції, тенденцією цих пристроїв є розробка менших форм-факторів для покращення інтеграції та гнучкості програм [16].

У представленому пристрої одночасно із випромінювачем вбудована система стаблізації оптичного сигналу, аналогічна зображеій на рисунку 2.7. Схемотехнічна реалізація подібних систем рідко зустрічається у технічних літературних джерелах. Подібна техологія була раніе представлена у роботі [17]. Електрична схема розробки представлена на рисунку 2.10.

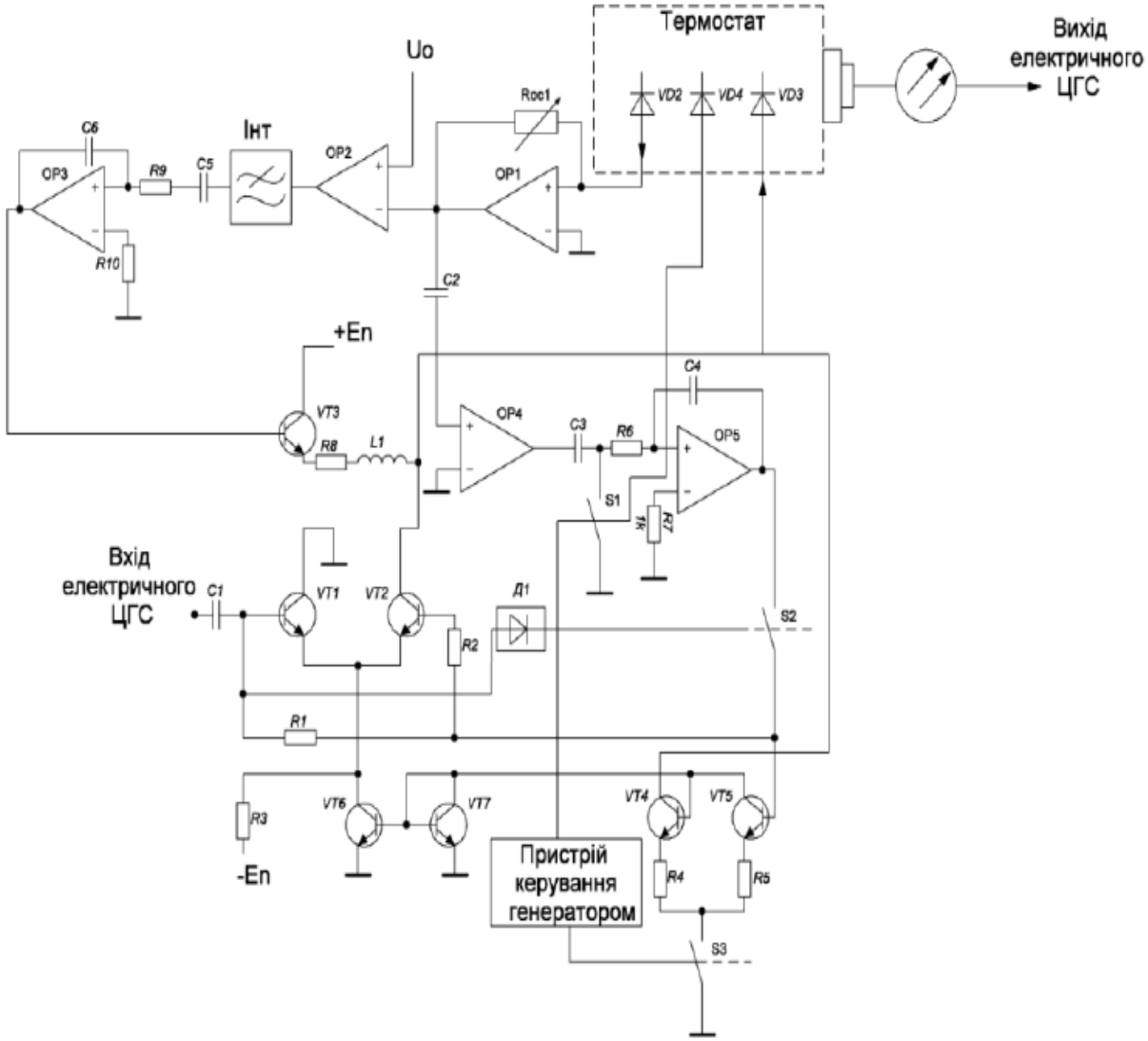


Рисунок 2.10 - Система стаблізації оптичного сигналу [17]

Як видно із схеми, компонента база має спрощений варіант. Тому, для забезпечення більш ефективної роботи випромінювача, у якості стабілізуючого пристрою у роботі використовуємо схему стабілізації лазерного світлодіода, засновану на IMC XL4015 [18].

Функціональна схема IMC XL4015 предсталена на рисунку 2.11 [18].

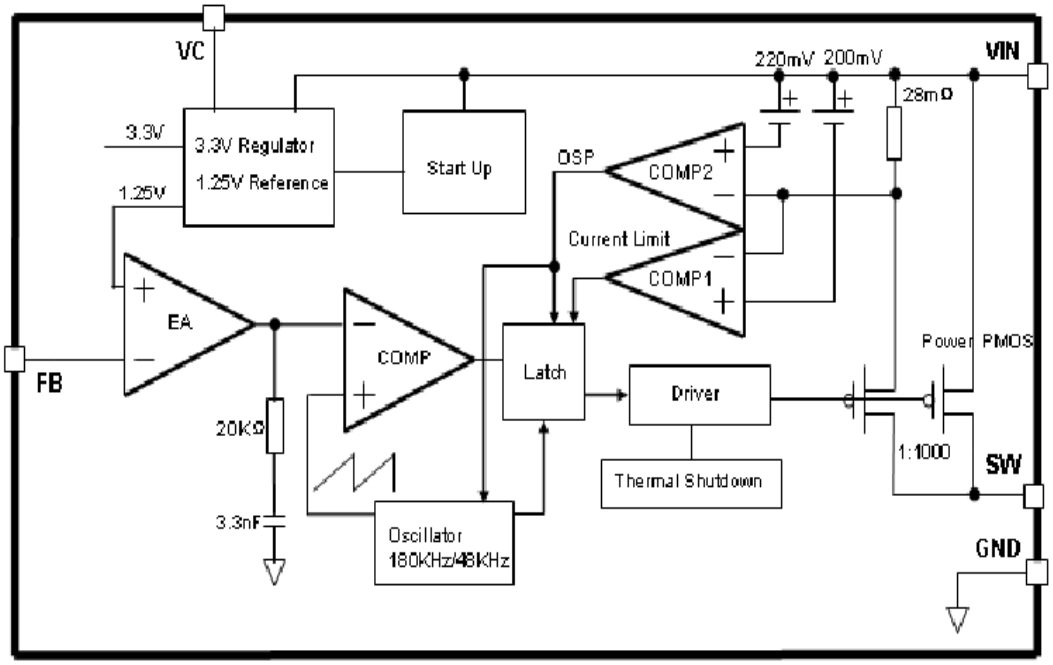


Рисунок 2.11 - Функціональна схема IMC XL4015

Приклад типового використання IMC XL4015 у схемі стабілізації параметрів світлодіодних випромінювачів представлений на рисунку 2.12[18].

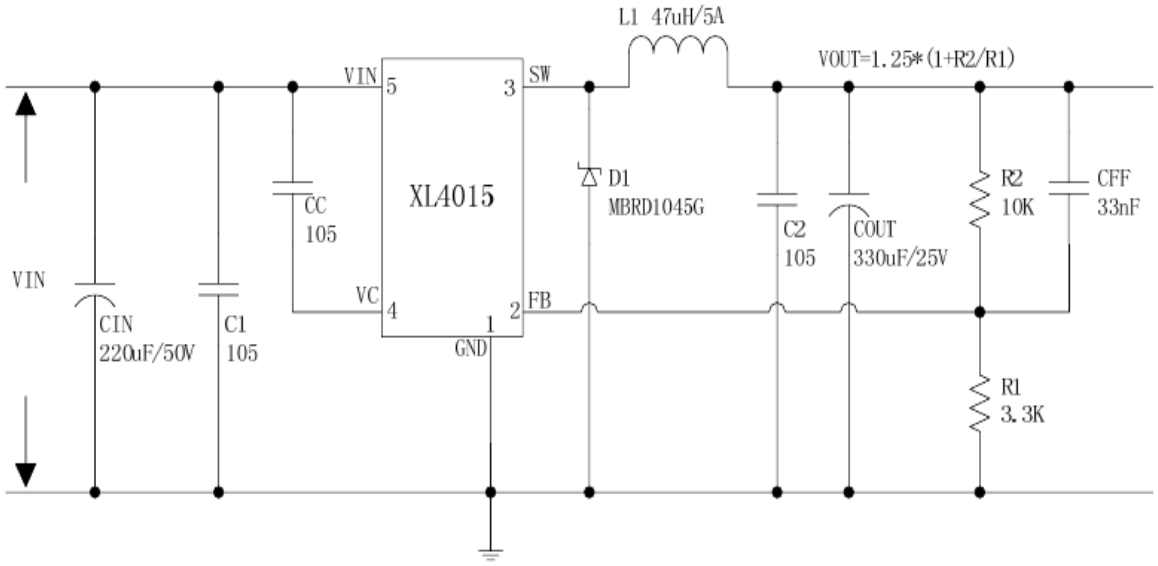


Рисунок 2.12 - Використання IMC XL4015 у схемі стабілізації параметрів світлодіодних випромінювачів.

Остаточно схема стабілізації лазерного світлодіода розробки представлена нарисуку 2.13.

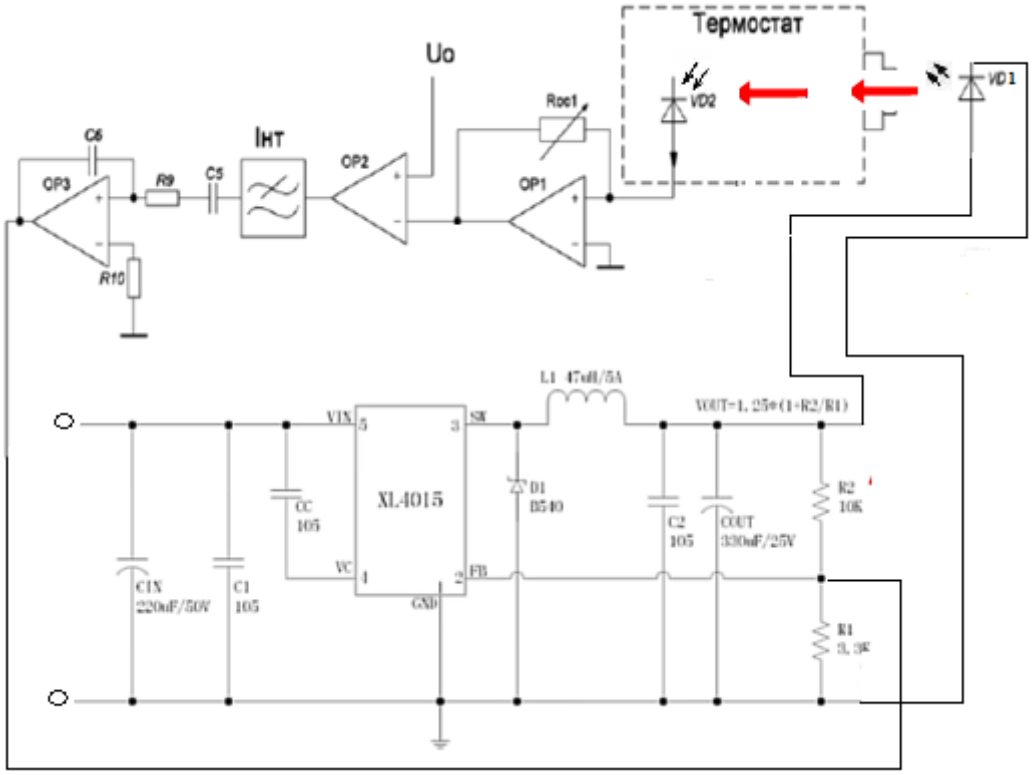


Рисунок 2.13 – Схема стабілізації лазерного світлодіода оптоволоконного датчика магнітного поля.

Схема передбачає підключення до мікроконтролера через вивід FB [18].

2.3 Мікроконтролерна система реєстрації сигналу оптоволоконного датчика магнітного поля

Більшість схем датчиків з волокном в реагують на зміну фази оптичного сигналу. Ці зміни виникають при зовнішніх впливах на світловод, обумовлених механічними деформаціями, тиском, температурою, магнітним або електричним полем [10,11].

Зміна фази електромагнітного випромінювання, що поширюється у

світловоді, може бути визначена з співвідношення [10,11]:

$$\Delta\varphi = \beta \cdot \Delta k + \Delta\beta \cdot k, \qquad (2.2)$$

де l і Δl – довжина й зміна довжини світловода; β і Δβ – стала поширення і її зміна у світловоді.

Зміна Δβ визначається з наступного співвідношення [10,11]:

$$\Delta\beta = \Delta n \frac{d\beta}{dn} + \Delta r \frac{d\beta}{dr}, \qquad (2.3)$$

де Δn – відхилення показника заломлення, Δr – зміна радіуса осердя світловода.

Принцип дії заснований на зміні оптичної довжини ходу. При цьому потужність, що реєструється фотодетектором, пропорційна зміні фази відповідно до співвідношення [10,11]:

$$P \approx (1 + \cos\Delta\varphi), \qquad (2.4)$$

де, Δφ - зміна фази.

Для забезпечення стабільної реєстрації вимірювального сигналу у роботі запропоновано використати реєстратор інфрачервоного (ІЧ) випромінювання EL7900 фірми Intersil [20].

EL7900 – це оптичний датчик, що об`єднує фотодіод і підсилювач струму на одній монолітній мікросхемі. Вихідний струм прямо пропорційний інтенсивності світла, що діє на фотодіод. Його чутливість вище, ніж у фототранзистора. Особливості мікросхеми EL7900: монолітна мікросхема; містить фотодіод і підсилювач; діапазон від 1 до 8000 люкс; перетворення світла в струм; напруга живлення від 2,7 В до 5,5 В, малий струм живлення - 1 мкА; малий час відгуку – 200мкс; вихідна характеристика близька до лінійної; компактний і легкий корпус для поверхневого монтажу (рисунок 2.14) [20].

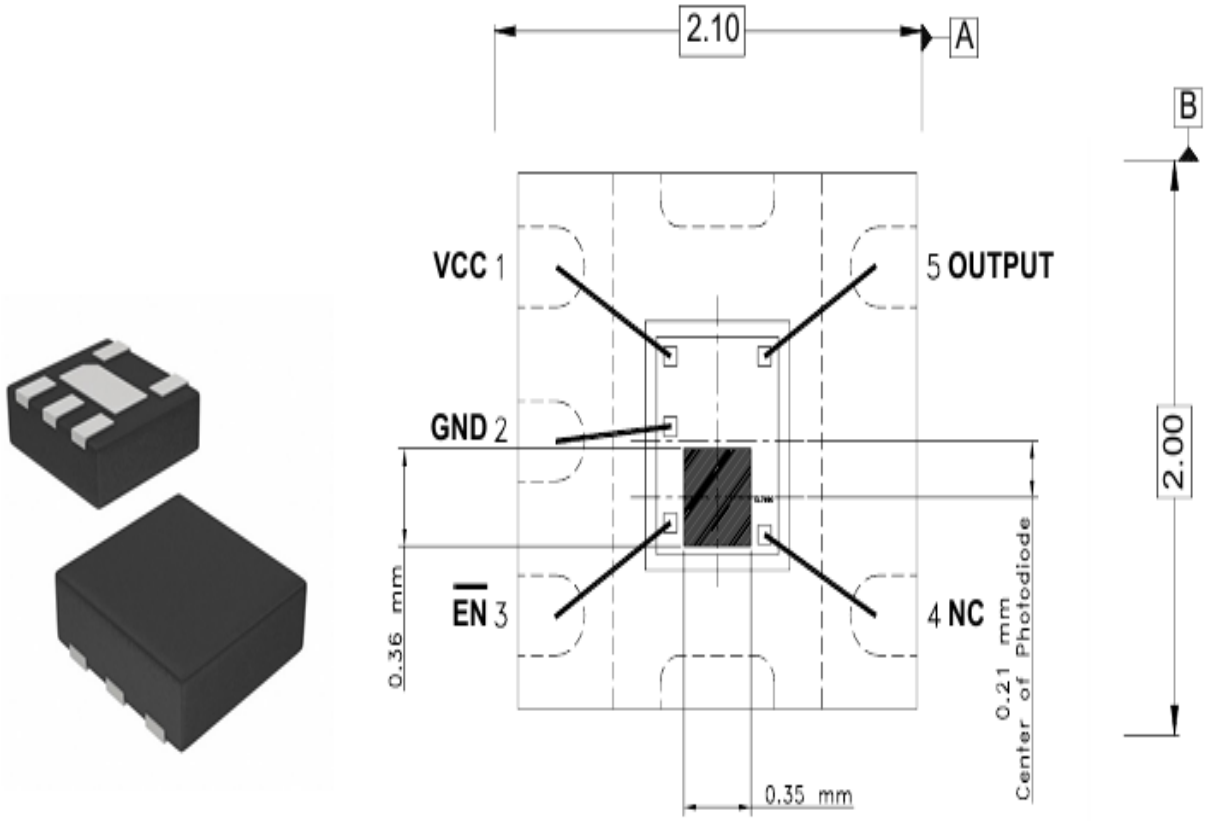


Рисунок 2.14 – Зовнішній вигляд і габаритні розміри датчика EL7900

На рисунку 2.15 представлена спектральна чутливість датчика.

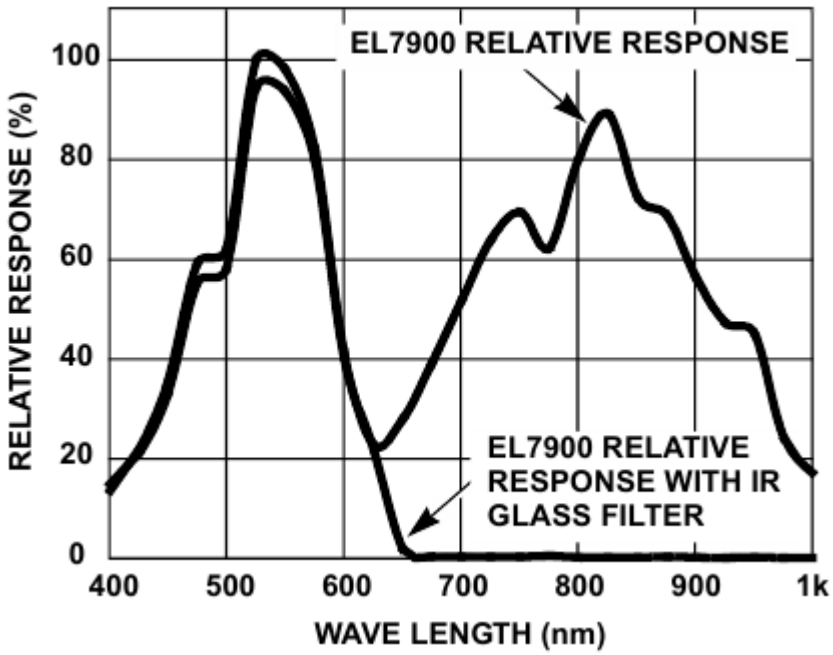
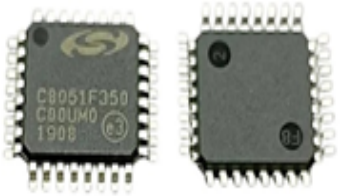
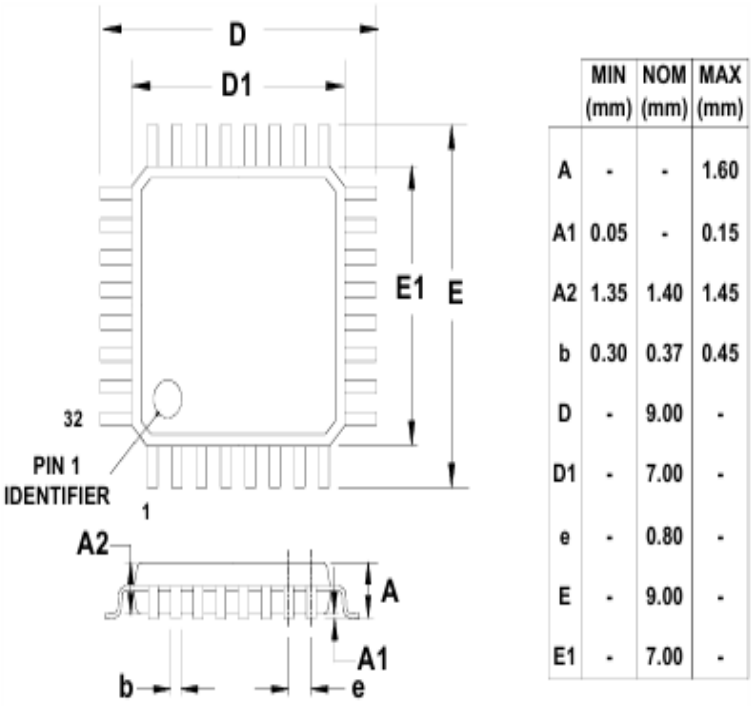


Рисунок 2.15 – Спектральна чутливість датчика EL7900

Як видно із графіка, чутливість датчика добре узгоджується із довжиною хвилі вимірюваного сигналу – майже 90% на 810 – 820 нм.

Для забезпечення ефективної обробки та автоматизації вимірювального каналу у розробці використовується мікроконтролерна схема, яка заснована на використанні мікроконтролера C8051F340 [21]. На рисунку 2.16 представлений зовнішній вигляд та габаритні розміри мікроконтролера C8051F340.





	MIN (mm)	NOM (mm)	MAX (mm)
A	-	-	1.60
A1	0.05	-	0.15
A2	1.35	1.40	1.45
b	0.30	0.37	0.45
D	-	9.00	-
D1	-	7.00	-
e	-	0.80	-
E	-	9.00	-
E1	-	7.00	-

Рисунок 2.16 - Зовнішній вигляд та габаритні розміри мікроконтролера C8051F340.

На рисунку 2.17 представлена функціональна схема мікроконтролера C8051F340 [21].

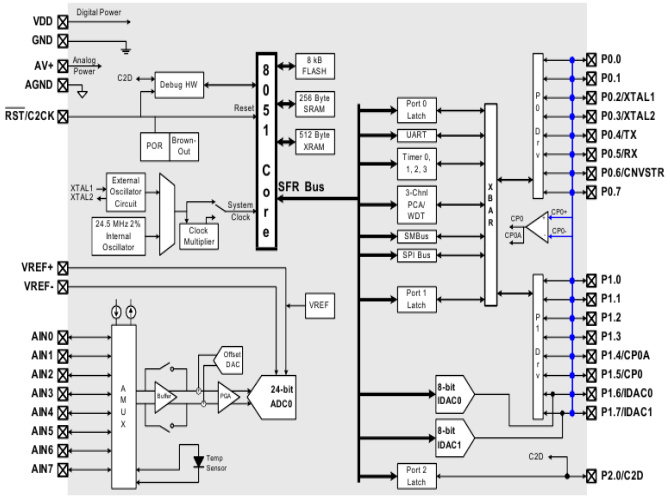


Рисунок 2.17 - Функціональна схема мікроконтролера C8051F340

Технічні характеристики мікроконтролера C8051F340 [21].

Аналогові модулі. 10-розрядний АЦП (до 200 тис. перетворень в секунду); вбудований аналоговий мультиплексор, що працює в одноканальному і диференційному режимі; живлення від зовнішнього та внутрішнього джерела; вбудований датчик температури; можливість зовнішнього запуску; два компаратори; внутрішня опорна напруга. Вбудований USB-контролер. USB специфікація 2.0; підтримка повної швидкості або низької швидкості; вбудоване відновлення синхронізації, для підтримки повної або низької швидкості не потрібно зовнішніх генераторів; буферна пам'ять USB; вбудований приймач не потребує зовнішніх резисторів. Вбудоване налагодження контролера. Забезпечуються точки зупинки, покроковий запуск команд, контроль/модифікація пам'яті і регістрів; висока продуктивність систем відладки з використанням емуляції [21].

Високошвидкісний процесор серії MCS8051: конвеєрна архітектура виконання програми; 70% інструкцій виконується в 1 або 2 системних такти; швидкодія процесора – 48 MIPS; розширений обробник переривань. Пам'ять: 4352 байт пам`яті RAM; 64К байт пам`яті Flash, яку можна перепрограмувати під час роботи блоками по 512 байт [21].

Цифрові модулі: 40 портів вводу-виводу; апаратні інтерфейси SPI, SMBus, два послідовних порти UART; чотири 16-розрядних таймера/лічильника загального призначення; 16-бітний програмований масив лічильників з п'ятьма модулями порівняння; інтерфейс підключення зовнішньої пам'яті (EMIF) [21].

На рисунку 2.18 представлений приклад підключення мікроконтролера C8051F340 до ПК по протоколу UART(RS-232/485).

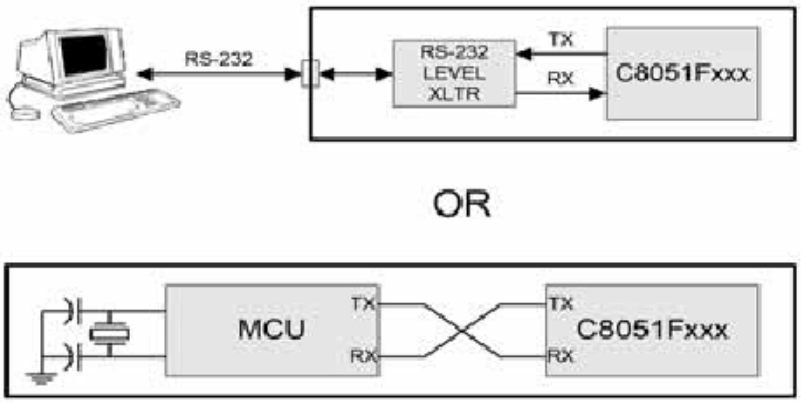


Рисунок 2.18 - Підключення мікроконтролера C8051F340 до ПК за протоколом UART(RS-232/485)

Підтримка інтерфейсів SPI, SMBus(I2C), UART(RS-232/485) надає можливість побудови на основі модуля CP2201EB гетерогенних (різнорідних мережевих систем на основі сполучення мережі Ethernet та промислових мереж [21].

Джерела опорної частоти: внутрішній генератор, що має похибку 0,25% і можливість відновлення тактової частоти, а також підтримує всі режими USB і UART; зовнішній генератор: кварцовий, RC, або C; внутрішній генератор низької частоти (80 кГц) [21].

У результаті проведеної роботи була розроблена остаточна схема підключення схеми стабілізації лазерного світлодіода, реєстратора EL7900 до мікроконтролера C8051F340 із можливістю з’єднання із ПК за протоколом UART(RS-232/485). Схема представлена на рисунку 2.19.

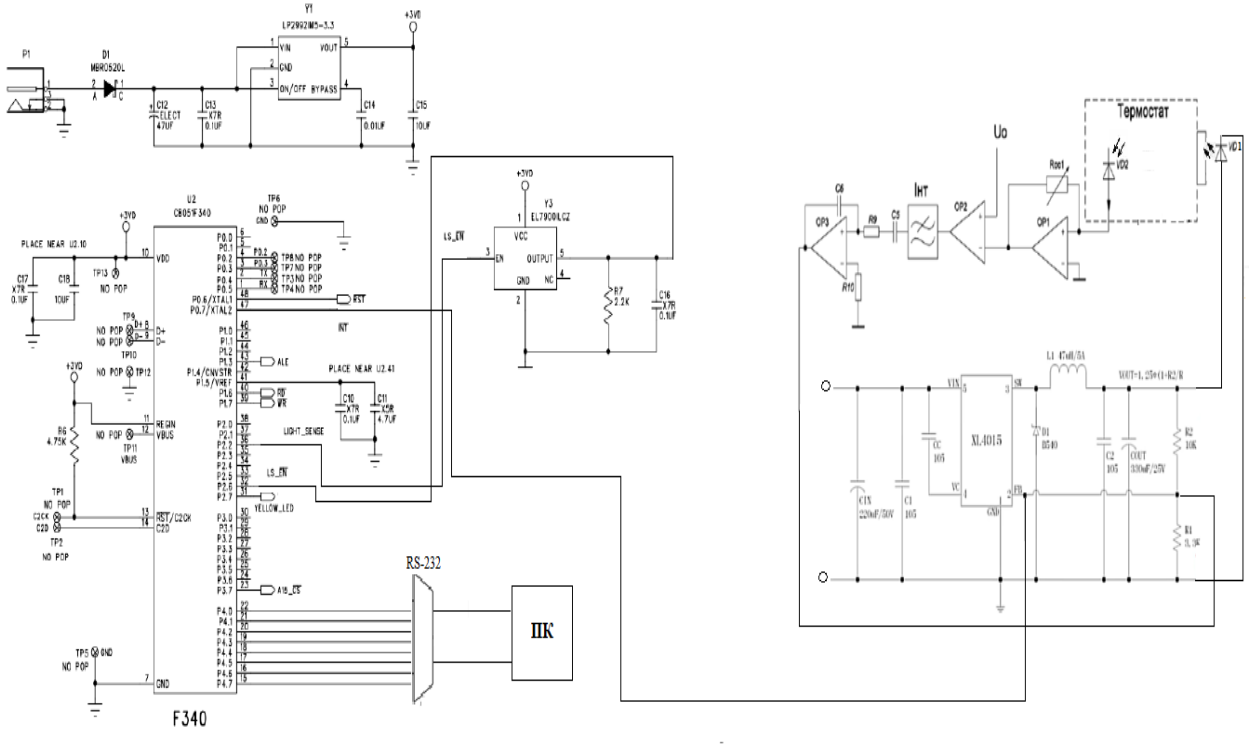


Рисунок 2.19 – Електрична схема датчика магнітного поля

2.4 Моделювання функціональних блоків електрооптичної складової датчика магнітного поля

2.4.1 Моделювання схеми стабілізації лазерного світлодіода датчика магнітного поля

Функціональність схеми стабілізації лазерного світлодіода перевірялась за допомогою online симулятора Multisim [22]. На рисунку 2.20 представлені результати моделювання у редакторі Multisim.

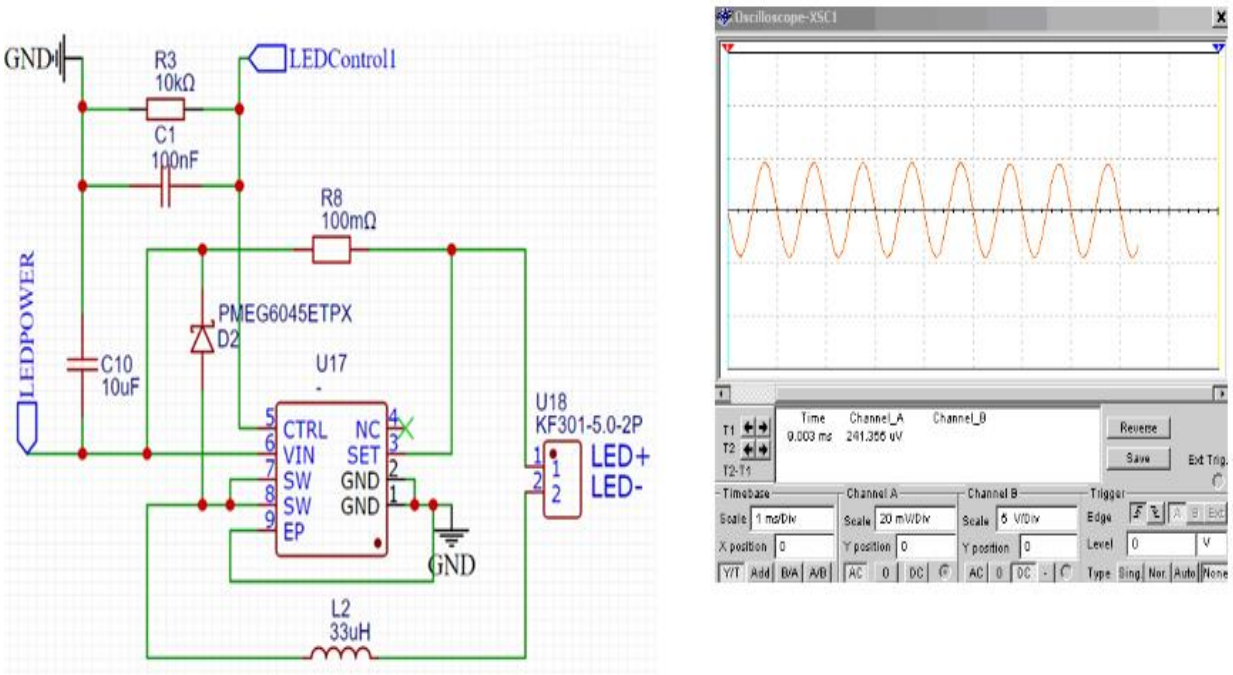
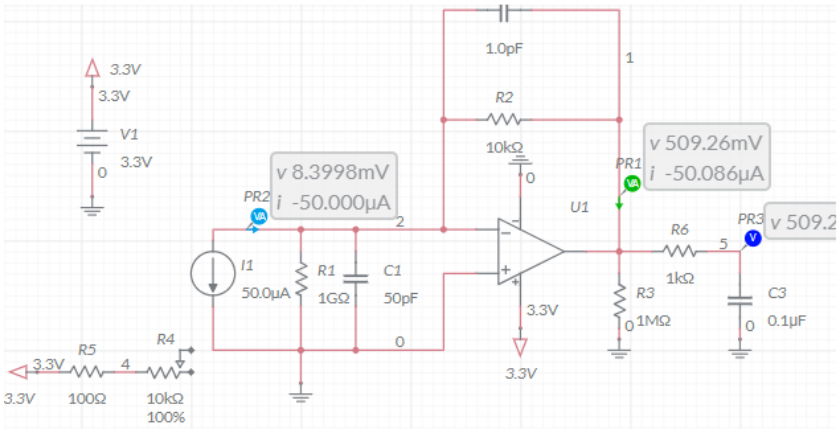


Рисунок 2.20 - Моделювання схеми стабілізації лазерного світлодіода у редакторі Multisim

Як видно із результатів, при значній пульсації з амплітудою на вході схеми 6 В, на виході схеми – постійна напруга низької пульсації 20 мВ. Це свідчить про добру стабільність вихідних параметрів драйвера.

2.4.2 Моделювання роботи схеми реєстратора ІЧ випромінювання датчика магнітного поля

Функціональність схеми реєстратора ІЧ випромінювання датчика магнітного поля також перевірялась за допомогою online симуляторів Multism [22]. На рисунку 2.21 представлені результати моделювання у редакторі Multisim.



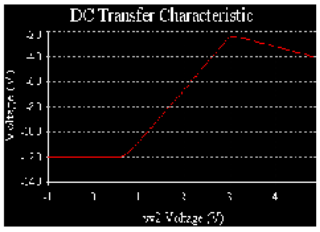


Рисунок 2.21 - Моделювання схеми реєстратора ІЧ випромінювання датчика магнітного поля у редакторі Multisim

Використовуючи функцію редактора Transient Analysis [22],знімаємо підсилювальну характеристику пристрою реєстрації сигналу. Як видно із графіка, підсилювальна хаоктеристика має лінійний характер, що добре узгоджується із параметрами, які зазначені виробником.

Отже, за матеріалами розділу можна зробити наступні висновки:

1) особливістю датчика є магніточутлива система, яка містить волокно для підвода світлового потока, елемент Фарадея, аналізатор і поляризатор виготовлені в одному блоці;

2) у якості елемента Фарадея використовуємо тербій-галієвий гранат (TGG, $Tb_3Ga_5O_{12}$);

3) для забезпечення стабільного функціювання датчика у якості джерела випромінювання обираємо лазерний світлодіод на основі AlGaAs, так як довжина хвилі випромінювання таких світлодіодів складає 750 - 890 нм;

4) у якості оптоволокна був обраний оптоволоконний кабель спеціального призначення української компанії «Оптокон»;

5) у роботі икористана технологія волоконно-зв’язаного лазерного діоду із оптоволокном, що значно підвищить ефективність зв’язку та стабільність сигналу;

6) для забезпечення стабільної реєстрації вимірювального сигналу у роботі запропоновано використати реєстратор інфрачервоного (ІЧ) випромінювання EL7900 фірми Intersil;

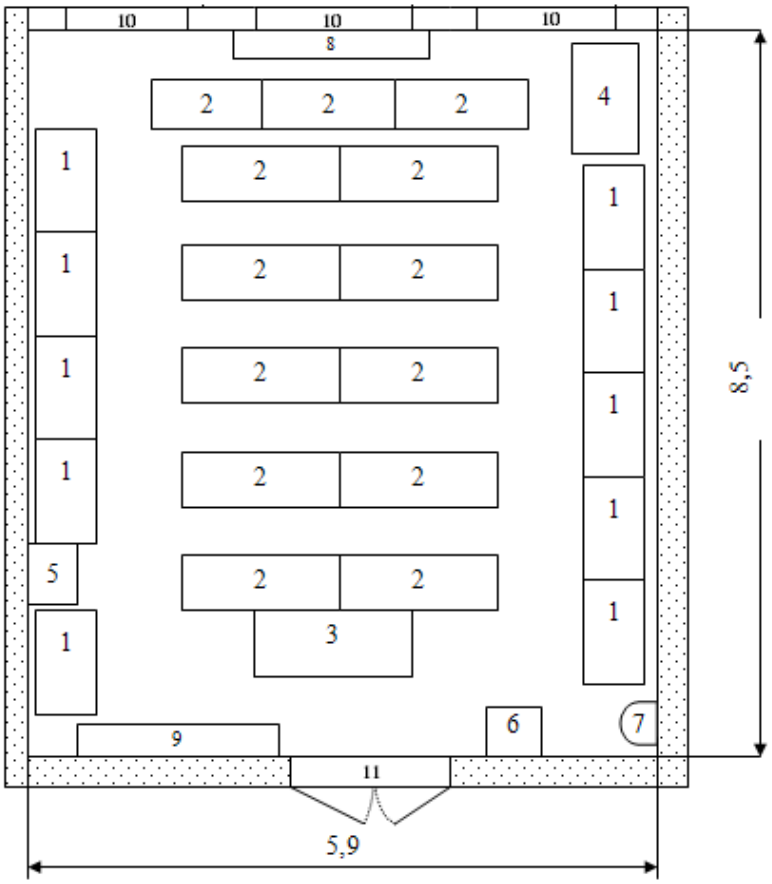
7) для забезпечення ефективної обробки та автоматизації вимірювального каналу у розробці використовується мікроконтролерна схема, яка заснована на використанні мікроконтролера C8051F340 із можливістю з’єднання із ПК за протоколом UART(RS-232/485);

8) за допомогою online симулятора Multisim було провдено моделювання роботи основних блоків електричної схеми датчика магнітного поля. Результати моделювання добре узгоджуються із експериментом.

3 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем оптоволоконного датчика магнітного поля

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

В даному розділі як об’єкт дослідження розглянуто приміщення в якому проводяться роботи по дослідженню та вивченню мікропроцесорних систем. План приміщення наведено на рисунку 3.1 [23-25].



1 - стіл комп’ютерний, 2 - стіл аудиторний, 3 - стіл викладача, 4 - установка Холла, 5 - шафа силова, 6 - сейф, 7 - умивальник, 8 - спліт система, 9 - дошка аудиторна, 10 - вікно, 11 - двері

Рисунок 3.1 – План розташування робочих місць

Приміщення, в якому знаходяться відео термінальні пристрої, має такі характеристики:

- довжина приміщення 8,5 м;
- ширина приміщення 5,9 м;
- висота 4 м;
- число вікон 3;
- кількість робочих місць 28;
- забарвлення інтер'єру: біла стеля, блідо-бежеві стіни, підлога бетонна, обтягнута лінолеумом коричневого кольору.

Відповідно до ПХТ 12.0.003-74 небезпечні та шкідливі фактори за природою дії поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні [23-25].

В даному приміщені діють такі фізичні небезпечні та шкідливі фактори:

• підвищений рівень вібрацій, інфразвукових коливань, ультразвуку, іонізуючих випромінювань, статичної електрики, електромагнітних випромінювань, ультрафіолетової чи інфрачервоної радіації;

• підвищені чи знижені барометричний тиск, вологість, іонізація та рухомість повітря;

• небезпечне значення напруги в електричному колі; підвищена напруженість електричного чи магнітного полів;

• недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла;

Також присутні небезпечні та шкідливі психофізіологічні фактори, до яких належать фізичні (статичні та динамічні) і нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, перенапруження органів чуття, монотонність праці, емоційні перевантаження).

3.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Одним із заходів є підвищення комфортності роботи шляхом раціоналізації параметрів робочого місця та робочого приміщення з ергономічної точки зору [23-25].

Обсяг приміщення на одного працюючого за санітарними нормами має становити не менше 20 $м^3$, а площа приміщення – не менше 6 $м^2$. Ширина основних проходів у приміщенні повинна становити не менше 1,5 м. Ширина виходів з приміщення повинна бути не менше 1 м, висота – не менше 2,2 м. Дане приміщення має обсяг V=188,06 $м^3$, а площу S=50,15 $м^2$. Таким чином наше приміщення не відповідає нормам з ергономічної точки зору.

Для зменшення впливу психофізіологічних факторів складено правильний графік трудового дня, встановлено необхідний час перерв, темп та ритм роботи, які необхідні для зменшення дії на організм людини фізичних зусиль, що в свою чергу дозволяють захистити людину від перевтомлення та втрати здоров'я [23-25].

3.3 Виробнича санітарія

Мікроклімат характеризується наступними параметрами: температура, вологість, швидкість повітря, атмосферний тиск, шум [23-25].

Для нашого приміщення температура підтримується завдяки вентиляції (природної і штучної) в теплу пору року, та за допомогою опалення та герметизації приміщення в холодну пору року. Оптимальні норми температури для холодної пори року 21-23°С, для теплої складає 22-24°С.

Наше приміщення відповідає цим температурним нормам.

В даному приміщенні є два види вентиляції:

– природна (аерація через вікна і двері);

– примусова (приточно-витяжна).

Функціонально близьким, але відмінним від вентиляції за способом повітрообміну є кондиціонування. В даному приміщені є наявність кондиціонера, який підтримує в приміщенні комфортні умови незалежно від зовнішніх умов (визначеної температури, вологості, чистоти повітря і швидкості повітряних потоків).

Вологість повітря в даному приміщенні не 40-60%, що відповідає оптимальним нормам. Це реалізується за допомогою вентиляції і кондиціонування приміщення, а також за рахунок проведення вологих збирань.

У приміщенні є наявність відео термінальних пристроїв та учбових стендів для проведення лабораторних робіт. Всі ці устаткування мають низький рівень шуму, що в свою чергу не перевищує допустиму норму рівня шуму в 65 дБ.

В нашому приміщенні, де знаходяться відео термінальні пристрої, використовується змішане освітлення, тобто поєднання природного і штучного освітлення.

В якості природного - бокове освітлення через вікна. В даному приміщенні використовується загальне штучне освітлення.

Розрахунок його здійснюється за методом світлового потоку з урахуванням потоку, відбитого від стін і стелі [23-25].

Нормами для даних робіт в даному приміщенні встановлена необхідна освітленість робочого місця Ен = 300лк (середня точність роботи по розрізненню деталей розміром від 1 до 10 мм).

3.4 Електробезпека

Приміщення сухе, добре опалюване з струмонепровідною підлогою, з температурою 18-24 °С, з вологістю 40-50%. З електроустаткувань в ньому знаходяться відео термінальні пристрої та учбові стенди, які знаходяться під напругою.

Причини ураження електричним струмом [23-25].

1. Пошкодження устаткування.
2. Пошкодження ізоляції.
3. Коротке замикання на землю або на корпус.
4. Порушення правил техніки безпеки и роботи с електроустаткуванням.

Для забезпечення електробезпеки в даному приміщенні використовуються такі технічні засоби:

- захисне заземлення;
- мала напруга;
- захисне відімкнення;
- ізоляція струмопроводів;
- знаки безпеки.

Захисне заземлення — навмисне електричне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих струмопровідних частин, що можуть опинитися під напругою.

Учбові стенди, які знаходяться в приміщенні, працюють на мінімально можливих напругах, що забезпечує додаткову безпеку.

Усі електроустаткування можна у разі потреби вимкнути через електронний щит управління, який миттєво знеструмлює усі стенди та відео термінальні пристрої. Скрізь, де встановлені розетки є попереджувальні знаки.

3.5 Пожежна та техногенна безпека об’єкту

Приміщення відноситься за вибухопожежною небезпекою до категорії “Б” [23-25].

Основними причинами пожеж в даному приміщенні є:

- необережне поводження з вогнем;

- незадовільний стан електротехнічних пристроїв, порушення правил їх

- монтажу та експлуатації;

- невиконання вимог нормативних документів з питань пожежної безпеки.

Приміщення за класом пожеж відноситься до категорії “Е” [23-25].Це горіння обладнання та установок, які знаходяться під електричною напругою. Серед необхідних засобів гасіння пожежі в даному приміщені є два вуглекислих вогнегасники типу ОУ-2. Для мінімізації виникнення пожежі в даному приміщені вчасно проводиться профілактичний огляд та ремонт електроустаткування. В приміщенні є план евакуації згідно якого люди повинні залишити приміщення у разі виникнення пожежі. Ширина шляхів евакуації в світлі повинна бути не менше 1 м, дверей - не менше 0.8 м. При дверях, що відкриваються з приміщень в загальні коридори, за ширину евакуаційного шляху коридором слід приймати ширину коридору, зменшену:

- на половину ширини дверного полотна - при однобічному розташуванні дверей,

- на ширину дверного полотна - при двосторонньому розташуванні дверей.

Висота проходу на шляхах евакуації повинна бути не менше 2 м. У підлозі на шляхах евакуації не допускаються перепади висот менше 45 см і виступи, винятком порогів в дверних отворах. Висота дверей у просвіті на шляхах евакуації повинна бути не менше 2 м.

3.6 Розрахунок штучного освітлення точковим методом

Точковий метод призначений для розрахунку локалізованого та комбінованого освітлення, а також освітлення похилих площин [23-25]. Загальне локалізоване освітлення, а також загальне рівномірне при наявності суттєвих затінень повинні розраховуватись за точковим методом. Цей же метод використовується при розрахунку освітленості похилих площин та відкритих просторів, а також місцевого освітлення. Відбита складова освітленості у точковому методі враховується наближено.

Метод називається точковим тому, що дозволяє визначити потужність освітлювальної установки на основі розрахунку освітленості в будь-якій точці робочої поверхні. Методом користуються у всіх випадках, коли метод коефіцієнта використання є неприйнятним (в приміщеннях, захаращених обладнанням, затемнених і т. ін.), а також у випадку перевірки освітленості окремих ділянок. Він широко використовується при розрахунку освітлення конвеєрних ліній та галерей, охоронного освітлення, освітлення сходів, спусків, доріг, залізничних колій, підземних протяжних виробок і т. п.. Метод дає хороші результати у випадках використання світильників прямого та переважно прямого світла.

Для виконання розрахунку освітлення попередньо вибирають тип світильників та варіант їх розміщення (висоту підвісу та відстань між ними). В загальному випадку точковий метод дозволяє знайти освітленість робочої поверхні, довільно орієнтованої в просторі. В практиці проектування освітлювальних установок випадки розрахунку освітленості на похилих площинах зустрічається рідко, частіше виникає необхідність розрахунку освітлення або на поверхні, перпендикулярній вісі симетрії світильника (го-

ризонтальна освітленість), або на поверхні, паралельній їй (вертикальна освітленість). Це дає можливість спростити схему розрахунку.

Освітленість E_N в точці А на площині, перпендикулярній променю світла, що падає в цю точку, залежить від сили світла Iα в цьому напрямку та віддаленості r джерела до точки [23-25].

$$E_N = \frac{I_\alpha}{r^2}. \tag{3.1}$$

Освітленість в точці А на горизонтальній та вертикальній площині відповідно становить:

$$E_г = \frac{I_\alpha}{r^2} \cdot \cos\alpha, \tag{3.2}$$

$$E_в = \frac{I_\alpha}{r^2} \cdot \sin\alpha. \tag{3.3}$$

Для практичних розрахунків доцільно положення джерела світла (точка О) визначати через координати h, d та кута α. Тоді із трикутника АОВ можна знайти:

$$\cos\alpha = \frac{h}{r}, \tag{3.4}$$

$$r = \frac{h}{\cos\alpha}. \tag{3.5}$$

Тоді вище наведені залежності для освітленості можна представити:

$$E_г = \frac{I_г \cdot \cos^3\alpha}{h^2}, \tag{3.6}$$

$$E_в = \frac{I_\alpha \cdot \cos^2\alpha \cdot \sin\alpha}{h^2} = E_г \cdot \mathrm{tg}\alpha\ . \tag{3.7}$$

Приймаючи до уваги, що криві розподілення сили світла світильників приводяться для умовної лампи з світловим потоком 1000 лм, для реальної лампи

$$I'_\alpha = c \cdot I_\alpha, \tag{3.8}$$

$$c = \frac{\Phi_л}{1000}, \tag{3.9}$$

де $\Phi_л$ – світловий потік реального джерела світла, лм.;

I_α – сила світла в напрямі точки А за характеристиками світлорозподілення світильника.

Тоді остаточна залежність для розрахунку освітленості в точці А:

$$E_г = \frac{c \cdot I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{h^2 \cdot k_з}, \tag{3.10}$$

де $k_З$ – коефіцієнт запасу, що враховує зниження світлового потоку в процесі експлуатації освітлювальної установки.

Освітленість в розрахунковій точці визначається від кожного світильника, тобто загальна освітленість в точці знаходиться як сума освітленостей $\sum E_г$ від всіх світильників [23-25]. Розрахунок вважається закінченим, якщо зберігається умова $E_{min} \geq \sum E_г$.

Практично розрахункова освітленість може відрізнятися від нормованого значення в межах –10% … +20%. Якщо умова з такими припущеннями не виконується, необхідно скоректувати розташування світильників.

В якості контрольних вибираються такі точки в межах приміщення, для яких $\sum E_г$ є мінімальною.

Якщо використовується світильник з несиметричним світло розподіленням, положення розрахункової точки А відносно джерела світла буде визначатися висотою hp, кутом α та кутом φ, що відраховується від площини симетрії світильника OO'O" (рисунок 3.2).

При цьому значення кутів визначається з рисунку 3.2:

$$\alpha = arctg\frac{d}{h_p}; \quad \varphi = arctg\frac{b}{a}. \tag{3.11}$$

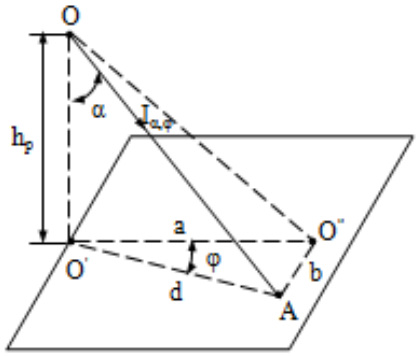


Рисунок 3.2 – Координати, що визначають положення точкового елементу, що світиться, відносно розрахункової точки А

Знайдені значення кутів α та φ дозволяють, користуючись кривими рівних значень сили світла, визначити значення сили світла в напрямі розрахункової точки і розрахувати освітленість елементу поверхні в цій точці [40-45].

$$E_г = \frac{I_{\alpha,\varphi} \cdot \cos^3 \alpha}{h_p^2} \quad . \tag{3.12}$$

Стосовно випадку розташування світильників світними лініями (світильники з люмінесцентними лампами) широко використовують видозмінений точковий метод – метод кривих рівної відносної освітленості. Характеристикою світних ліній є лінійна густина світлового потоку ламп (Ф'), лм/м, що визначається діленням сумарного потоку ламп Ф в лінії на її довжину (L). При цьому лінії з рівномірно розподіленими по їх довжині розривами (lp) розглядаються в розрахунках як безперервні якщо lp ≤ 0,5 h. Для протяжних ліній з такими розривами можна рахувати:

$$\Phi' = \frac{\Phi}{l_{с.л.} + l_p}, \tag{3.13}$$

де Ф – потік ламп в суцільній частині лінії ($l_{с.л.}$).

При l_p > 0,5 h для кожної суцільної частини лінії окремо визначається Ф' і створювана цією частиною освітленість.

Розрахунок освітлення виконується за допомогою лінійних ізолюкс, які дають відносну горизонтальну освітленість ε при h = 1 м та Ф' = 1000 лм/м, що приводяться в довідниках для проектування освітлення.

Відносна освітленість ε за графіками лінійних ізолюкс визначається для точок, що знаходяться навпроти кінця ряду світильників, в залежності від координат:

– відносна довжина світної лінії

$$L' = \frac{n \cdot (l_c + l_p)}{h} \quad , \tag{3.14}$$

– відносна відстань від проекції осі лінії до контрольної точки А

$$P' = \frac{P}{h} \quad . \tag{3.15}$$

Освітленість в точках, що знаходяться не навпроти кінця ряду світильників, визначається шляхом розподілу лінії на дві її частини або доповнення умовним відрізком з послідуючим складанням чи відніманням освітленості.

Підсумовуючи значення ε для всіх рядів, що освітлюють контрольну точку, знаходять $\sum\varepsilon$.

Після цього знаходиться густина потоку Ф', необхідна для одержання в точці заданої освітленості Е при коефіцієнті запасу Кз:

Помноживши Ф' на довжину кожного ряду світильників l, знаходиться повний світловий потік ламп ряду, на основі чого підбирається кількість та потужність ламп [23-25].

Висновки та рекомендації

Отже, за результатами роботи можна зробити наступні висновки:

1) перспективними ефективними інструментами дослідження магнітного поля можуть стати оптоволоконні сенсорні системи (оптоволоконні датчики);

2) особливістю датчика є магніточутлива система, яка містить волокно для підвода світлового потока, елемент Фарадея, аналізатор і поляризатор виготовлені в одному блоці;

3) у якості елемента Фарадея використовуємо тербій-галієвий гранат (TGG, $Tb_3Ga_5O_{12}$);

4) для забезпечення стабільного функціювання датчика у якості джерела випромінювання обираємо лазерний світлодіод на основі AlGaAs, так як довжина хвилі випромінювання таких світлодіодів складає 750 - 890 нм;

5) у якості оптоволокна був обраний оптоволоконний кабель спеціального призначення української компанії «Оптокон»;

6) у роботі икористана технологія волоконно-зв’язаного лазерного діоду із оптоволокном, що значно підвищить ефективність зв’язку та стабільність сигналу;

7) для забезпечення стабільної реєстрації вимірювального сигналу у роботі запропоновано використати реєстратор інфрачервоного (ІЧ) випромінювання EL7900 фірми Intersil;

8) для забезпечення ефективної обробки та автоматизації вимірювального каналу у розробці використовується мікроконтролерна схема, яка заснована на використанні мікроконтролера C8051F340 із можливістю з’єднання із ПК за протоколом UART(RS-232/485);

9) за допомогою online симулятора Multisim було провдено моделювання основних блоків електричної схеми датчика магнітного поля. Результати моделювання добре узгоджуються із експериментом.

Як рекомендації щодо розроблюваного пристрою можна відмітити наступне:

1) система може бути використана в подальших дослідженнях нових клектронних пристроїп систем енергозбереження;

2) макетний варіант системи може бути використаний в лабораторному практикумі та при проведенні практичних занять кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення.

Перелік посилань

1. Матеріали сайту Interesting Engineering URL: https://interestingengineering.com/science/light-magnetically-influences-not-just-illuminates (дата звернення 10.01.2026).

2. Benjamine Assouline and Amir Capua. Faraday effects emerging from the optical magnetic field / Journal of Scientific Reports, 15, 2025, URL: https://doi.org/10.1038/s41598-025-24492-9 (дата звернення 10.01.2026).

3. Кушнір О, Луців-Шумський Л., Корчак Ю. Практикум з фізики кристалів: Навчальний посібник. Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008. 240 с.

4. Фізика : підручник / І. Є. Лопатинський, І. Р. Зачек, Г. А. Ільчук, Б. М. Романишин. Львів : Афіша, 2009. - 384 с.

5. Чолпан, П.П. Фізика: підручник / П.П. Чолпан. – Київ : Вища школа, 2003. - 568 с.

6. Посудін Ю.І. Фізика: підручник / Ю.І. Посудін. - Біла Церква: Вид-во БНАУ, 2008. - 250 с.

7. Ripka, P. Magnetic Sensors and Magnetometers / P. Ripka. – Boston: Artech house, 2000. – 494 p.

8. Ripka P. Advances in Magnetic Field Sensors // IEEE Sensors journal. – 2010. – Vol. 10, N 6. – P.1108-1116.

9. EMI Shielding: Methods and Materials—A Review. S.Geetha, K.K. Satheesh Kumar, Chepuri R.K. Rao, M. Vijayan, D.C. Trivedi. Journal ofAppliedPolymer Science,Vol. 112, 2073–2086 (2009).

10. Кучеренко О. К. Волоконна і інтегральна оптика. [Електронний ресурс]. / О. К. Кучеренко // – Режим доступу: https://ooep.kpi.ua/contact.html Київ: 2017. – 216 с.

11. Кучеренко О. К. Волоконно-оптичні датчики для автоматизованих інформаційних та інтелектуальних систем [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані системи та технології», спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи і технології»/ О. К. Кучеренко. «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 113 с.

12. Матеріали сайту компанії Wavelength Opto-Electronic https://wavelength-oe.com URL : http:// https://wavelength-oe.com (дата звернення 10.01.2026).

13. Оптоелектронні інформаційні системи: Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка», освітньої програми «Мікро- та наноелектроніка» / В.М. Коваль; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,64 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 165 с.

14. Матеріали сайту компанії «оптокон» URL : http:// https://optokon.ua (дата звернення 10.01.2026).

15. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання: навч. посіб. У 2 кн. / В. О. Чадюк. – Київ : НТУУ «КПІ», 2012. Кн. 2. 436 с.

16. Матеріали сайту компанії JTBYShield Laser Technology Co., Ltd URL : https://www.jtbyshield.com (дата звернення 10.02.2026).

17. Дрючин О. О., Отт В. І. Стабілізація випромінювання передавачів оптичного діапазону // Журнал Вимірювальна та Обчислювальна Техніка в Технологічних Процесах, № 22, 2016, С. 41 – 45.

18. Матеріали сайту компанії Shanghai Xinlong Semiconductor Technology Co., Ltd. URL: https://www.xlsemi.com (дата звернення 01.02.2026).

19. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання : навч. посіб. У 2-х

кн. / В. О. Чадюк. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – Кн. 1. 376 с.

20. Матеріали сайту компанії Intersil Corporation URL: https://www.intersil.com (дата звернення 01.02.2026).

21. Матеріали сайту компанії Silicon Laboratories Inc. URL: https://www.silabs.com(дата звернення 01.02.2026).

22. Матеріали сайту URL : https://www.multisim.com (дата звернення 01.02.2026).

23. Бєлоконь К. В., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Інформаційні технології в охороні праці : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА спец. 263 "Цивільна безпека" ден. та заоч. форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 160 с. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/2018/f359035.pdf.

24. Бєлоконь К. В., Рижков В. Г., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Основи охорони праці : навч.-метод. посіб. Запоріїжжя : ЗДІА, 2015. 180 с. URL http://ebooks.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/do2018/f356296.pdf.

25. Бєлоконь К. В., Суржицька Л. А., Цимбал В. А., Карнаух А. А. Цивільний захист : конспект лекцій. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 69 с. URL: http://files.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/do2018/f356329.pdf.

Додаток 1

Матеріали XIX університетської науково-практичної конференції студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених
«МОЛОДА НАУКА-2026»

Білецький Дмитро
магістрант 1 курсу, ІННІ ім. Ю.М, Потебні ЗНУ
Богуцький Ярослав
магістрант 1 курсу, ІННІ ім. Ю.М, Потебні ЗНУ
Скакунов Дмитро
студент 4 курсу, ІННІ ім. Ю.М, Потебні ЗНУ
Науковий керівник – к.ф.-м.н., доцент Світанько М.В

СЕНСОРНА СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ НЕТРАДИЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення

Дослідження останніх років у галузі енергозберігаючих технологій показують зростання популярності оптичних методів дослідження параметрів енергетичних систем [1]. Такі вимірювальні (сенсорні) системи створюються на базі оптоволоконних датчиків [1,2]. На рисунку 1 представлений принцип функціювання такого дачика [2].



Рисунок 1 – Схема оптоволоконного датчика

Такий пристрій є стійким по відношенню до зовнішніх впливів і має можливість вимірювати одночасно декілька технологічних параметрів [2].

У роботі пропонується багатофонкціональна сенсорна система для одночасного вимірювання механічного тиску, магнітного поля та тиску акустичних коливань. Схема представлена на рисунку 2.

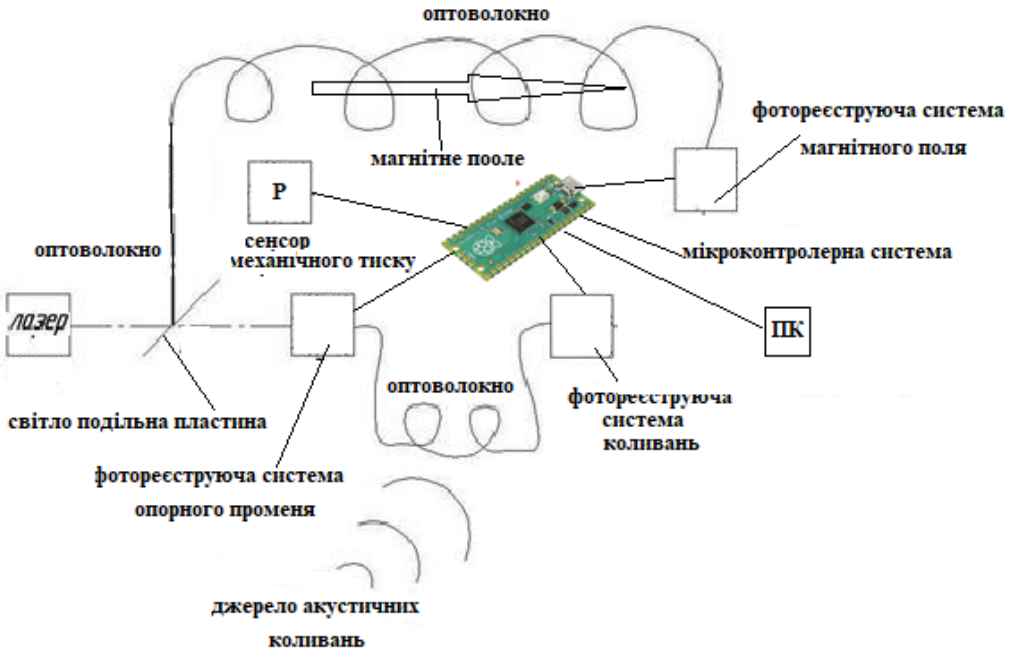


Рисунок 2 - Багатофункціональна сенсорна система

Уякості автоматизованої системи обробки сигналів використовується мікроконтролер Raspberry Pi Pico, функціювання якого контролюється за допомогою персонального комп’тера ПК. [3,4]. Схема на мікроконтролері Raspberry Pi Pico дасть можливість оперативного паралельного втручання в роботу схеми для корекції параметрів. Вона також передбачає подальше розширення можливостей системи.

Література:

1. Матеріали сайту Interesting Engineering URL: https://interestingengineering.com/science/light-magnetically-influences-not-just-illuminates (дата звернення 10.01.2026).

2. Кучеренко О. К. Волоконно-оптичні датчики для автоматизованих інформаційних та інтелектуальних систем [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані системи та технології», спеціалізації «Комп’ютерно-інтегровані оптико-електронні системи і технології»/ О. К. Кучеренко. «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 113 с.

3. Матеріали сайту robo-education URL : https://robo-education.com.ua/sravnenie-platform-arduino-i-raspberry-pi-cto-vybrat-dlia-svoix-proektov (дата звернення 01.02.2026).

4. Сайт компанії raspberrypi URL : https://pip.raspberrypi.com (дата звернення 01.02.2026).