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 схеми модулятора оптичного сигналу

Виконав: студент IV курсу, групи 6.1763-2с
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)

В.В. Шевалдін
(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)

Шевалдіну Володимиру Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) *Розробка схеми модулятора оптичного сигналу*

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 *Лазерний світлодіод, 890 нм, 220 В, 3-12В, LTSpice*

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*1.* Системи оптичного бездротового зв'язку *2.* Розробка схеми модулятора оптичного сигналу *3.* Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем розробка схеми модулятора оптичного сигналу

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) *1. Структурна схема модулятора опичного сигналу 2. Схема*

електрична модулятора опичного сигналу 3. Моделювання функціональних блоків модулятора опичного сигналу

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 _____ *Шевалдін В.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 64 сторінки, 25 рисунків, 2 таблиці, 37 джерел літератури.

Об’єкт дослідження – оптичні пристрої передачі інформації.

Мета роботи – розробка схеми модулятора оптичного сигналу.

Завдання роботи – розробити структурну схему модулятора оптичного сигналу; розробити електричні схеми основних функціональних блоків пристрою; провести моделювання роботи електричних схем пристрою.

Методика досліджень – моделювання пристрою за допомогою програмного забезпечення LTSpice.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено модулятор оптичного сигналу прямої модуляції лазерного світлодіода поверхневого випромінювання.

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

Прогнозні пропозиції – подальше вдосконалення пристрою передбачає використання енергонезалежного змінного резистора

ОПИЧНИЙ ІНФОРМАЦІЙНИЙ СИГНАЛ, ЛАЗЕРНИЙ СВІТЛОДІОД, ФОТОДІОД, МІКРОКОНТРОЛЕР, LTSPICE.

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. Системи оптичного бездротового зв’язку …….. 7

1.1 Загальна характеристика систем оптичного бездротового зв’язку (СОБЗ)…… 7

1.2 Сфери практичного застосування СОБЗ …….. 9

1.3 Сучасні напрямки розвитку СОБЗ …… 10

1.4 Надвисокочастотна (НВЧ) фотоніка у СОБЗ …… 11

1.5 Схеми оптичної лінії зв’язку …… 15

2. Розробка схеми модулятора оптичного сигналу…….. 22

2.1 Особливості функціювання схеми модулятора оптичного сигналу… 22

2.2 Структурна схема модулятора оптичного сигналу…….. 24

2.3 Джерело випромінювання…… 28

2.3.1 Напівпровідникові лазери поверхневого випромінювання (VCSEL) 28

2.3.2 Лазерний світлодіод з вбудованим фотодіодом моніторингу…….. 31

2.3.3 Світлодіоди Sony SLD…… 34

2.4 Мікроконтролерна система зворотнього зв’язку модулятора оптичного сигналу…….. 36

2.4.1 Схема регулювання постійної середньої потужності сигналу…….. 36

2.4.2 Мікроконтролер узгодження модульованого оптичного сигналу і струму світлодіода……... 39

2.5 Моделювання роботи лазерного світлодіода з вбудованим фотодіодом моніторингу……. 42

2.6 Терморегульований енергонезалежний змінний резистор DS1858…. 46

3 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем розробка схеми модулятора оптичного сигналу…….. 47

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів……. 47
3.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів……. 48
3.3 Виробнича санітарія……. 49
3.4 Електробезпека……... 52
3.5 Пожежна та техногенна безпека об’єкту…… 53
3.6 Розрахунок місцевого освітлення робочого місця при монтажі елементів на плату…….. 54
Висновки та рекомендації……..... 57
Перелік посилань…….…… 59
Додаток 1……. 63

Вступ

Ідея використовувати світло для передавання повідомлень виникла декілька тисячоліть тому. Спочатку це були димові сигнали; естафета з багать, розкладених на пагорбах, могла нести на сотні кілометрів інформацію, наприклад, про наближення ворога. У третьому столітті до нової ери на невеличкому острові у Середземному морі біля єгипетського міста Олександрія було побудовано Олександрійський маяк, який димом вдень та полум'ям уночі попереджав моряків про небезпечні рифи на вході у бухту. Цей маяк простояв понад тисячу років, його назвали одним із семи див світу [1-3].

Використовувати світло для передавання сигналу в електронному пристрої почали у 1960-х роках XX ст., з'єднавши в одному корпусі мініатюрну лампочку розжарювання та фоторезистор і створивши перший оптрон. Оптичний зв'язок між двома частинами електронного пристрою забезпечує їх гальванічну розв'язку, яка захищає пристрій від електричного пробою та паразитного зворотного зв'язку, а також дозволяє узгоджувати частини пристрою за опором. У 1970-х роках лампочки в оптронах замінили світлодіодами і створили додатково оптрони з іншими напівпровідниковими фотоприймачами – фотодіодами, фототранзисторами та фототиристорами. Останнє десятиліття показало, що використання оптичного інтерфейсу дає змогу зменшити тепловиділення та рівень електромагнітних завад всередині комп'ютерного процесора, що означає можливість підвищити його швидкодію [1-5].

Подальший розвиток як компонентної, так і схемотехнічної бази для оптичних інформаційних систем є досить актуальним завданням.

1. Системи оптичного бездротового зв’язку

1.1 Загальна характеристика систем оптичного бездротового зв’язку (СОБЗ)

Оптичний бездротовий зв'язок (англ. Optical wireless communications, OWC) - форма оптичного зв'язку, в якому видиме, інфрачервоне (IR), або ультрафіолетове (UV) світло використовується для передачі сигналу без використання дротових засобів зв'язку (наприклад, коаксіальний чи оптоволоконний кабель).

Швидке поширення систем бездротового зв'язку є одним із найвизначніших феноменів в історії технологій. За останні сорок років бездротові технології надзвичайно швидко стали дуже важливою складовою прогресу суспільства і залишатимуться такими в осяжному майбутньому. Широкомасштабне використання радіочастотних технологій (RF) стало ключовою передумовою поширення бездротових приладів та систем зв'язку. Проте, електромагнітний спектр розгорнених бездротових систем зв'язку має обмеження по місткості каналу, а також дорогий через наявність ексклюзивного ліцензування відповідних частот. Зі збільшенням потреби передачі великих обсягів даних через бездротові системи зв'язку, які RF спектр не в змозі забезпечити, почали розглядатися інші можливості бездротового зв'язку. Зокрема, використання верхньої частини спектру електромагнітного випромінювання, а не лише радіочастотного [6-8].

Оптичний бездротовий зв'язок (OWC) являє собою передачу даних в середовищі за допомогою оптичних носіїв, себто видимого, інфрачервоного (IR) та ультрафіолетового (UV) випромінювання без використання дротів. Передача сигналів з використанням вогню, диму, корабельних прапорців і оптичного

телеграфу[3] можливо вважати історичними формами оптичного бездротового зв'язку. Сонячне світло з давніх-давен також використовувалося для зв'язку на довгих відстанях. Найбільш раннє використання сонячного світла приписується давнім грекам і римлянам, які використовували їхні полірovані щити, щоб надсилати сигнал, відбиваючи сонячне світло під час битви[4]. У 1810 році Карл Фрідріх Гаус винайшов геліограф, який складався із пари дзеркал, які спрямовували контрольований пучок сонячного світла до віддаленого місця. Хоча першопочатково геліограф був створений для геодезичних робіт, він широко використовувався для військових цілей протягом кінця XIX та початку XX століть. У 1880 році Александр Грем Белл винайшов фотофон, відомий як перша у світі бездротова телефонна система.

Військовий інтерес зберігався і до фотофона. Наприклад, у 1935 році, німецька армія розробила фотофон, в якому лампа із вольфрамовою ниткою з інфрачервоним фільтром використовувалася як джерело світла. Також, американські і німецькі військові лабораторії продовжували розробку дугової лампи для оптичного зв'язку до 50-х років[5]. Нині OWC використовують лазери або світлодіоди як передавачі. У 1962 році MIT Lincoln Labs побудував експериментальне OWC з'єднання, що використовувало світлодіод на базі GaAs і було здатне забезпечити передачу телевізійного сигналу на відстань близько 50 км.Після винайдення лазерів, оптичний бездротовий зв'язок розглядався як основна область застосування лазерів. Було проведено багато випробувань, що використовували різні типи лазерів, а також схем модуляції[6]. Проте, загальні результати розчарували у зв'язку із великою розбіжністю лазерних пучків та неможливістю впоратися із негативними атмосферними ефектами (лазерні сцинтиляції, відхилення пучка та інші). З розвитком волоконної оптики у 70-х роках, оптоволоконні системи стали очевидним вибором для оптичної передачі даних на великі відстані і витіснили з горизонту оптичні системи бездротового зв'язку.

Протягом десятиліть основний інтерес до оптичного бездротового зв'язку лежав у сфері військових розробок і застосувань до космічної галузі, що включає міжсупутниковий зв'язок і зв'язок у відкритому космосі. До цього часу проникнення OWC на масовий ринок був значною мірою обмежений, за виключенням IrDA, яка мала великий успіх у сфері оптичного бездротового зв'язку в короткому діапазоні. Розробка новітніх і ефективних бездротових технологій для широкого діапазону передачі даних є неодмінною передумовою для побудови майбутніх гетерогенних мереж зв'язку. Такі мережі дозволять підтримувати широкий спектр різного роду сервісів з різноманітними шаблонами передачі даних і задовольнити щораз більший запит на великі обсяги передачі даних. Варіації OWC потенційно можуть бути використані для різних діапазонів відстаней, від оптичних інтерконекторів в інтегральних схемах, міжбудинкових бездротових сполучень до міжсупутникового зв'язку [8-10].

1.2 Сфери практичного застосування СОБЗ

Базуючись на діапазоні відстаней передачі, оптичний бездротовий зв'язок може розглядатися у п'яти категоріях [11-13]:

1. Оптичний бездротовий зв'язок в ультракороткому діапазоні: міжчіповий зв'язок у щільно упакованих мультичіпових модулях;
2. Оптичний бездротовий зв'язок в короткому діапазоні: застосунки бездротової натільної мережі (WBAN) і бездротової персональної мережі (WPAN) під стандартом IEEE 802.15.7, підводний зв'язок;
3. Оптичний бездротовий зв'язок в середньому діапазоні: домашній IR та комунікація видимим світлом для (VLC) для бездротових локальних мереж (WLANs), міжтранспортного і транспорт-інфраструктура зв'язку;

4. Оптичний бездротовий зв'язок в довгому діапазоні, міжбудинкове підключення, Free-Space Optical Communications (FSO);
5. Оптичний бездротовий зв'язок в ультрадовгому діапазоні: міжсупутниковий зв'язок, системи зв'язку супутник-Земля [11-13].

1.3 Сучасні напрямки розвитку СОБЗ [14, 15]

1. Застосування OWC на ультравеликі відстані; NASA’s Lunar Laser Communication Demonstration (LLCD) передав дані із місячної орбіти на Землю з швидкістю 622 Мбіт/с (Mbps), листопад 2013.

2. В січні 2015 року, IEEE 802.15 сформував групу, яка напише ревізію до IEEE 802.15.7-2011, яка працюватиме з інфрачервоними довжинами хвиль і близьким ультрафіолетом, на додачу до видимого світла, а також додасть такі опції як Optical Camera Communications і Li-Fi.

3. Застосування OWC на великих відстанях із швидкістю передачі даних 1 Gbit/s. Було продемонстровано канал зв'язку довжиною 60 км між землею і літаком на швидкості 800 км/год, "Extreme Test for the ViaLight Laser Communication Terminal MLT-20 – Optical Downlink from a Jet Aircraft at 800 km/h", DLR і EADS, грудень 2013.

4. Продемонстровано бездротовий зв'язок нового покоління/комунікацію видимим світлом зі швидкістю 10 Мбіт/с з використанням полімерного світлодіода або OLED.

5. Дослідження щодо OWC проводяться в рамках Європейської дослідницької програми COST (European Cooperation in Science and Technology) на проєкті OPTICWISE, що фінансується Європейським науковим фондом і покликаний координувати національні дослідження на рівні Європи. Основною ціллю проєкту є створити Європейську наукову платформу для міждисциплінарних досліджень, що пов'язані з оптичним

бездротовим зв'язком. Стартував у листопаді 2011. Представлено понад 20 країн.

6. Впровадження споживчих і промислових OWC технологій представляє Li-Fi Consortium, засновано у 2011 році неприбутковою організацією, що займається представленням (поширенням) оптичного бездротового зв'язку. Займається впровадженням Li-Fi продуктів.

7. Прикладом роботи над OWC в Азії є VLCC(консорціум щодо комунікації видимим світлом) в Японії, засновано у 2007 році для реалізації через ринкові дослідження, просування, і стандартизації надійної, всеосяжної телекомунікаційної системи, що використовує видиме світло.

8. Декілька ініціатив щодо OWC є у США, включаючи "Smart Lighting Engineering Research Center", засновано у 2008 році Національним науковим фондом в партнерстві із Політехнічним інститутом Ренсселера (головна інституція), Бостонським Університетом і Університетом Нью-Мексико. В співробітництві з Говардським університетом, Morgan State University, і Rose-Hulman Institute of Technology.

1.4 Надвисокочастотна (НВЧ) фотоніка у СОБЗ

У 90-х роках XX ст. в оптоелектроніці з’явився новий напрям досліджень, названий надвисокочастотною (НВЧ) фотонікою (англ. Microwave photonics). [1,2]

Метою цих досліджень є створення ліній зв’язку, в яких НВЧ електричні сигнали, наприклад мобільного телефону, перетворювалися б в оптичні й передавалися у волоконно-оптичній лінії зв’язку або навпаки – оптичні сигнали перетворювалися на НВЧ-сигнали і передавалися у відкритому просторі. Останній метод дозволяє будувати широкосмугові лінії бездротового зв’язку (Wi-Fi), які працюють у терагерцовому діапазоні й

мають можливість швидкого передавання відеоінформації високої роздільної здатності. У 2013 р. німецькі вчені продемонстрували передавання інформації зі швидкістю 100 Гбіт/с у бездротовій лінії зв'язку завдовжки 20 м, в якій різницевий сигнал із частотою 237,5 ГГц, утворений двома лазерними діодами, подавався з фотодіода без підсилення на рупорну антену й приймався такою ж рупорною антеною, підключеною до інтегральної НВЧ-схеми на транзисторах з високомобільними електронами [16].

Розроблення методів генерації та оброблення НВЧ-сигналів оптичними методами дозволила створити оптоелектронні пристрої, недосяжні за параметрами для суто електронних аналогів.

Існує декілька методів генерації електричних НВЧ-сигналів за допомогою оптичного випромінювання:

1) змішування на фотодіоді випромінювання двох лазерних діодів, синхронізованих за допомогою оптичної інжекції модульованого випромінювання від задавального лазерного діода;

2) змішування на фотодіоді випромінювання двох лазерних діодів, синхронізованих за допомогою ланцюга зворотного зв'язку;

3) змішування на фотодіоді двох потоків випромінювання з різними частотами, які з'явилися після проходження випромінювання лазерного діода через інтегрально-оптичний інтерферометр Маха–Цендера, керований напругою НВЧ;

4) використання оптоелектронного генератора на основі інтерферометра Маха–Цендера, охопленого зворотним зв'язком [17-20].

На рисунку 1.1 показано порівняння втрат електричного сигналу у разі його передавання коаксіальним кабелем (пряме передавання електричного НВЧ-сигналу) і волоконно-оптичним кабелем (перетворення електричного НВЧ-сигналу в оптичний на вході кабелю, передавання оптичного сигналу і зворотне перетворення оптичного сигналу в електричний НВЧ-сигнал на виході кабелю) [17-20].

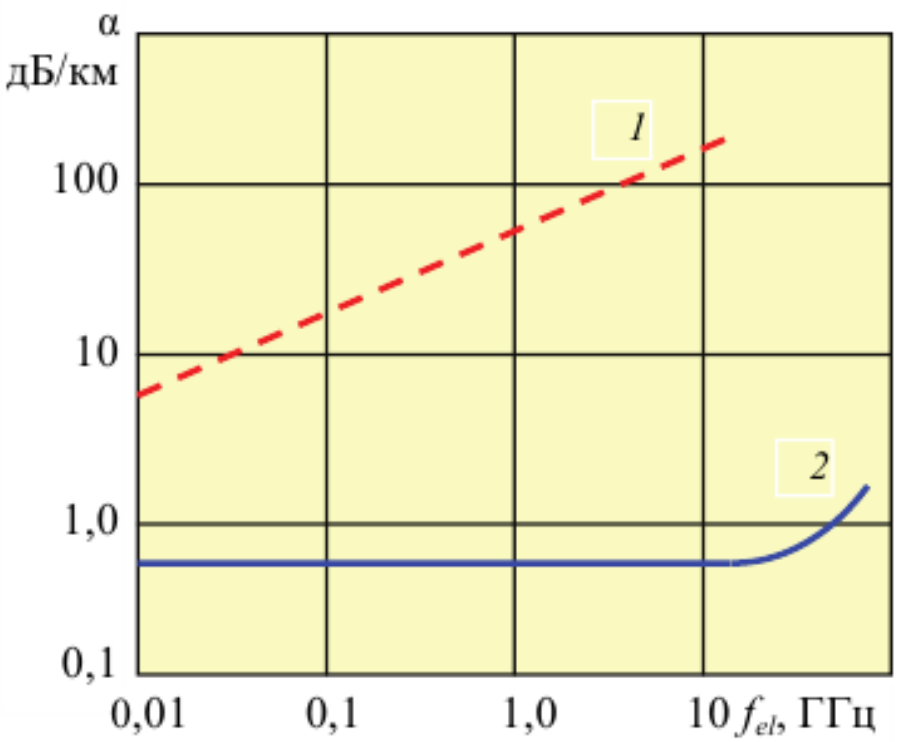


Рис. 1.1 - Втрати НВЧ-сигналу в разі його передавання коаксіальним кабелем (1) та одномодовим волоконно-оптичним кабелем на довжині хвилі 1,55 мкм (2).

Передавання НВЧ-сигналу може відбуватися некогерентно та когерентно, залежно від методу фотоприймання:

• у разі прямого (некогерентного) фотодетектування електричний НВЧ-сигнал модулює оптичне випромінювання за інтенсивністю, випромінювання передається до фотоприймача оптичним волокном і на виході фотоприймача з'являється переданий електричний НВЧ-сигнал;

• у разі гетеродинного (когерентного) фотоприймання електричний НВЧ-сигнал модулює оптичне випромінювання за інтенсивністю, фазою або частотою, випромінювання передається оптичним волокном до фотоприймача, на вході якого змішується з когерентним випромінюванням лазерного гетеродина; електричний НВЧ-сигнал з'являється на виході схеми оброблення сигналу фотоприймача [17-20].

Когерентний метод передавання НВЧ-сигналу, хоча і забезпечує більше відношення сигнал/шум, використовується досить рідко, тому що

потребує контролю поляризації випромінювання та стабілізації його частоти. Зокрема, його доцільно використовувати у довгих лініях зв'язку, де немає оптичних підсилювачів чи ретрансляторів і де внаслідок нелінійності волокна неможливо збільшити відношення сигнал/шум підвищенням потужності лазерного передавача [18].

Для реалізації оптичного зв'язку на чипі потрібні джерело випромінювання, хвилевід, модулятор, перемикач і фотоприймач. Джерелом випромінювання у процесорі є лазерний діод, випромінювання якого можна модулювати для введення інформації, змінюючи струм інжекції (пряма або внутрішня модуляція) або пропускання модулятора (зовнішня модуляція). Для прямої модуляції використовують лазер із вертикальним резонатором та поверхневим випромінюванням (VCSEL), розглянутий у [1]. Такий лазер виготовляють на основі елементів III та V груп таблиці Менделєєва, які важко узгодити з технологією кремнієвого чипа, тому цей лазер розміщують поза чипом, у блоці передавача, а з чипом з'єднують багатомодовим волокном.

Альтернативою VCSEL є лазер з розподіленим зворотним зв'язком (англ. distributed feed back laser, DFB laser). У звичайному лазері позитивний зворотний зв'язок, потрібний для генерації випромінювання, забезпечують дзеркала (елементи із зосередженими параметрами – коефіцієнтами відбиття). У лазері з розподіленим зворотним зв'язком дзеркал немає, а їх функції виконує хвилеподібна форма активного шару лазера. Пряма хвиля дифрагує на виступах активного шару і частина її енергії спрямовується назад, формуючи зворотну хвилю. Відбиття світла відбувається не в одній площині, а розподіляється по всій довжині активного середовища лазера [1].

1.5 Схеми оптичної лінії зв’язку

На рисунку 1.2 представлена схема оптичної лінії зв’язку, яку можна з успіхом використовувати у важкодоступній місцевості, на спортивних змаганнях, у туристичних походах та ін.

Промінь, що спрямований у бік приймального пристрою, повинен бути добре сфокусованим, щоб він менше розсіювався. У приймачі сигнал демодулюється, тобто розшифровується. Промінь через лінзу потрапляє на світлочутливий елемент, де перетворюється на електричні коливання звукової частоти, які потім посилюються і відтворюються через навушники. Для односторонньої розмови в межах прямої видимості достатньо мати один світлопередавач та один світлоприймач. Для двостороннього зв’язку знадобиться два однакових комплекти приймачів [2, 21-27].

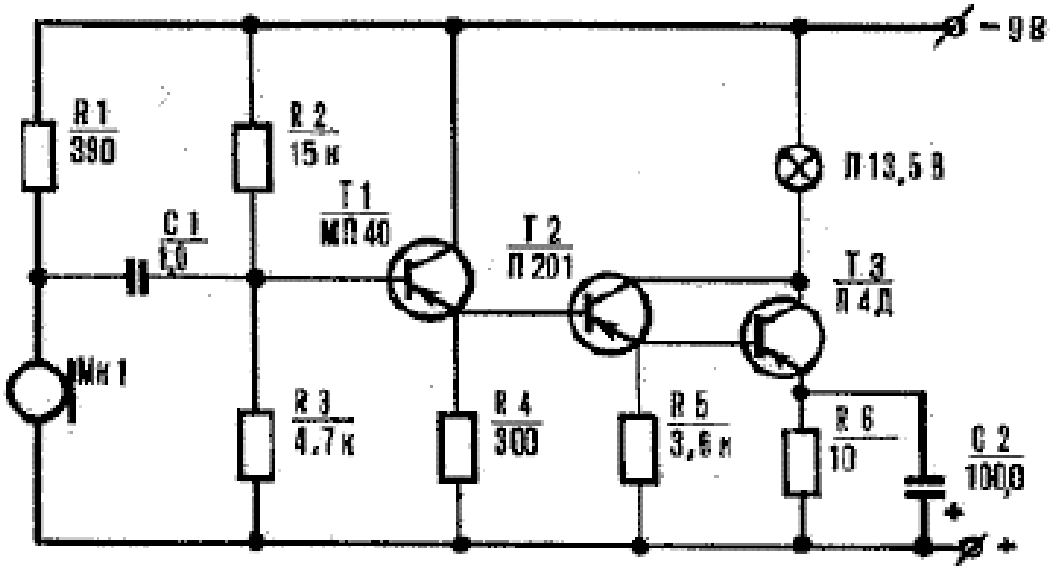


Рисунок 1.2 – Схема передавача оптичного телефона

Схема приймача (рис. 1.3) дуже проста. Вона є п’ятикаскадним підсилювачем низької частоти на малопотужних транзисторах Т1–Т5, на вхід якого ввімкнений фотодіод Д1, а на вихід – телефон Тф1 [2, 23, 26].

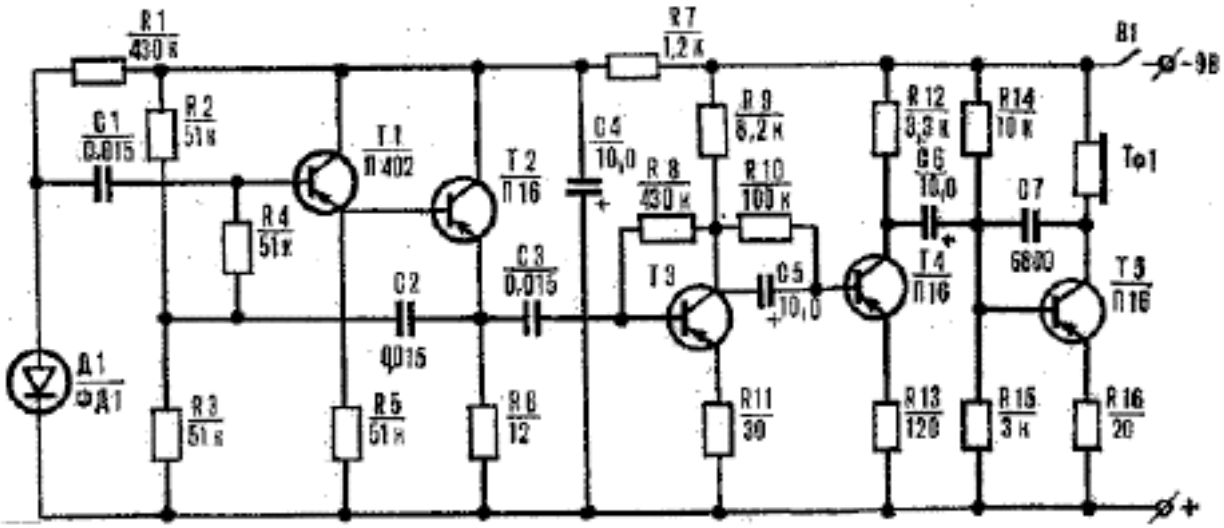


Рисунок 1.3 – Схема приймача оптичного телефона

Регулювання гучності сигналу, що приймається, не передбачено лише тому, що рівень сигналу не перевищує допустимого для цього підсилювача значення. Однак якщо виникне потреба в установленні такого регулятора, замінити постійний резистор R12 в колі колектора транзистора Т4 можна на змінний, до середнього виводу якого потрібно попередньо підключити конденсатор С6. Лазерний промінь дуже добре модулюється звуковими коливаннями. Достатньо підключити модуль від лазерної указки до виходу низькочастотного підсилювача і вийде готовий передавач звукового сигналу по світловому діапазону. Прийняти і перетворити світло на звук здатна будь-яка сонячна батарея. Навіть без підсилювача достатньо підключити до її виходу навушник і ви почуєте переданий світлом звук [2, 23, 26].

Отже, розглянута схема зв’язку працює за принципом оптичного телефону, дальність зв’язку – до 500 метрів. Носієм інформації у ній є не радіохвилі, а промінь світла. Щоб промінь наповнити необхідними повідомленнями, його потрібно промодулювати. Електричний сигнал із мікрофона подається на підсилювач низької частоти. Струм, що проходить через джерело світла, змінюється залежно від сигналу, що передається, відповідно змінюється потужність вихідного випромінювання. Світловий потік виявляється промодульованим напругою звукової частоти [2, 21-27].

Саме якраз на цьому етапі розробки виникають проблеми із забезпеченням стабільного каналу модуляції випромінювання інформаційним сигналом.

Серед усіх типів випромінювачів для розробки СОБЗ найкраще підходять напівпровідникові лазери, а точніше – лазерні діоди. Вони мають найпростіший і найзручніший механізм модуляції. Модуляція випромінювання – це зміна за заданим законом амплітуди, фази, частоти або поляризації оптичного випромінювання. Розмовляючи по телефону, людина своїм голосом змінює струм, що протікає через мікрофон телефонної трубки, тобто здійснює модуляцію струму. Якщо підсилити мікрофонний струм і пропустити його через лазерний діод як додаток до робочого струму, то відбудеться модуляція лазерного випромінювання відповідно до варіацій голосу людини. Тепер лазерний промінь можна відправити за десятки кілометрів, наприклад у повітрі, і той, хто спіймає цей промінь фотоприймачем, підсилить фотострум і пропустить струм через навушники або акустичні колонки, почує голос абонента. На ват-амперній характеристиці лазерного діода показано, як модуляція інжекційного струму викликає модуляцію потужності випромінювання (рисунок 1.4) [1].

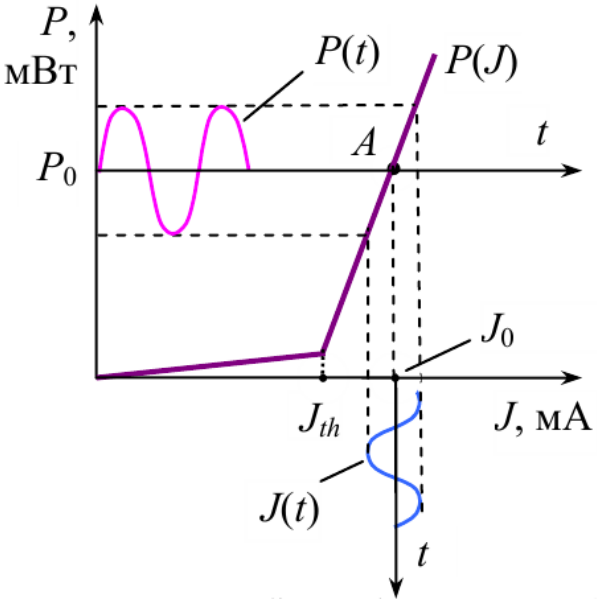


Рисунок 1.4 - Ват-амперна характеристика лазерного діода при модуляції випромінювання: J_{th} – пороговий струм; J_0 – робочий струм

Зміна струму за законом J(t) викликає модуляцію потужності випромінювання P(t) ~ J(t). Модуляція випромінювання зміною струму інжекції є внутрішнім (для лазерного діода – внутрірезонаторним) видом модуляції. Для більшості лазерів можливою є тільки зовнішня модуляція. Для того, щоб увести інформацію у світловий промінь і зробити оптичний сигнал з випромінювання, наприклад, гелій-неонового лазера, потрібний додатковий пристрій – модулятор. Модулятор пропускає лазерне випромінювання і змінює один з його параметрів за законом електричного сигналу. Здебільшого модуляції випромінювання досягають зміною електричним сигналом властивостей оптичного середовища модулятора, через яке проходить випромінювання. Лазер зі складеним вертикальним резонатором завдяки можливості незалежної зміни струму інжекції в активній та пасивній секціях має ще дві можливості для модуляції випромінювання [1].

Най простішим варіантом модуляції оптичного сигналу може бути приклад схеми передавача на транзисторі, яка зображена на рисунку 1.5.

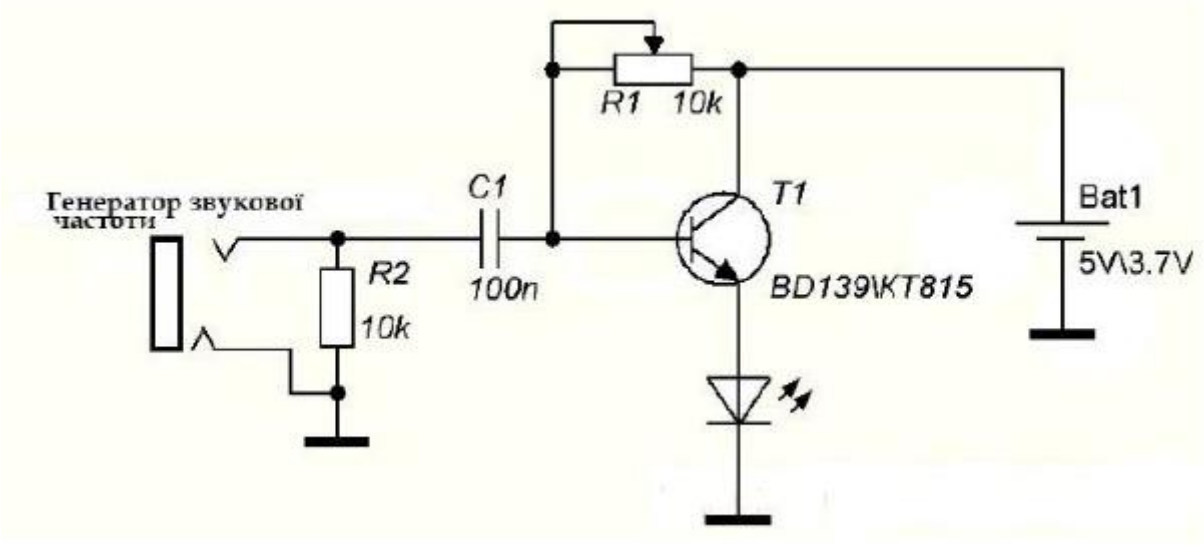


Рисунок 1.5 - Схема оптичного модулятора-передавача звуку

Для передавання звуку необхідно промодулювати лазер. Найкраще для цієї мети підходить увімкнення транзистора за схемою із загальним колектором (або емітерний повторювач). У такому ввімкненні на діоді буде напруга із зміною амплітудою, залежно від поданої напруги на базу Т1.

Також використання схеми із загальним колектором дозволить розширити діапазон напруги, який можна подавати на вхід пристрою загалом, без спотворень форми сигналу. Під час роботи пристрою лазер буде створювати потік світла змінної яскравості, майже не помітної оком. Буде видно просто промінь. Резистор R2 встановлений для невеликого навантаження джерела звуку. Конденсатор С1 має номінал від 100 нФ і більше. У іншому разі буде дуже помітний зріз низьких частот. Живлення краще здійснювати стабілізованим джерелом або батареєю.

Для розробки ефективного оптичного каналу зв'язку використання подібних елементарних схем є недостатнім. Представлена система, із урахуванням розвитку сучасних технологій оптоелектроніки, може бути реалізована за схемою, яка представлена на рисунку 1.6. Схему можна розділити на дві частини: зліва – приймач, праворуч – передавач [2, 23, 26].

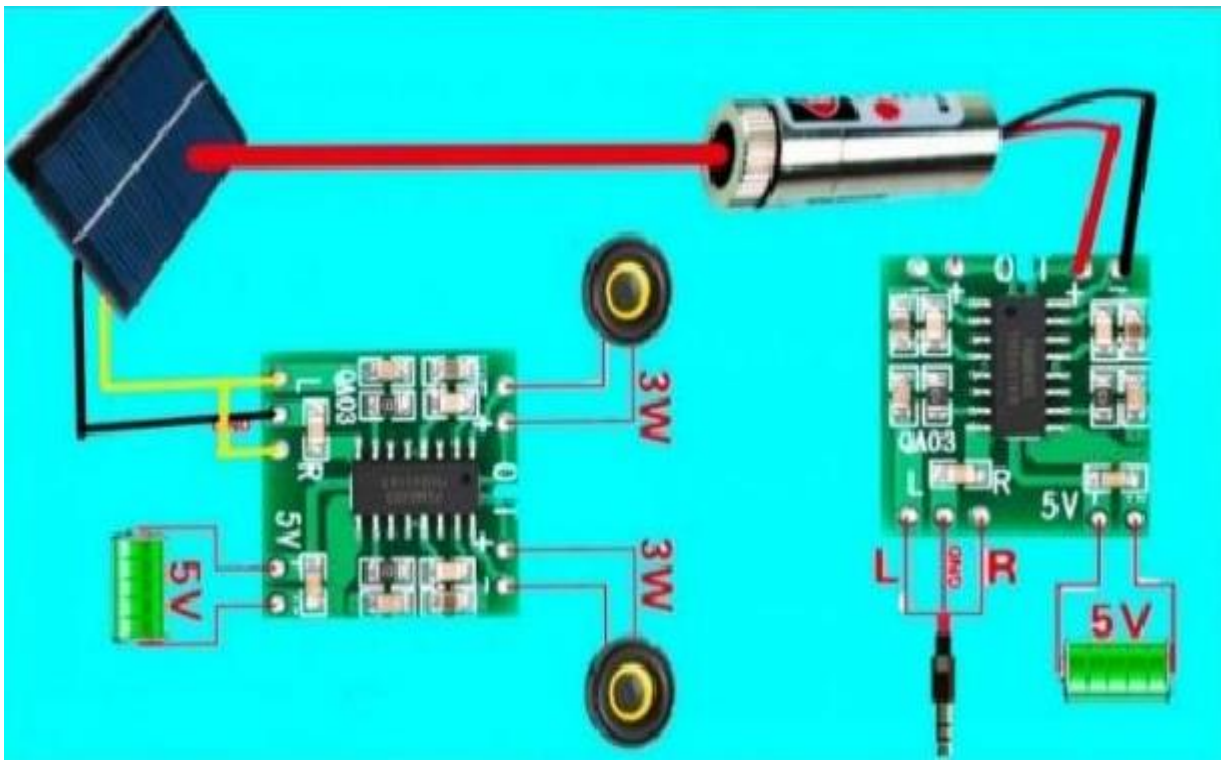


Рисунок 1.6 – Схема передавання звуку лазерним променем

Звук від смартфона надходить на підсилювач низької чистоти. Далі сигнал надходить на лазерний діод. Коливання модулюють лазерний

промінь, спрямований на сонячну батарею. З неї сигнал йде на інший підсилювач, де посилюється та надходить на динамічні головки [2, 23, 26].

У цій схемі для забезпечення стабільного сигналу модуляції потрібен ефективний стабілізатор струму/напруги для лазерного діода, реалізований за технологіями інтегральних мікросхем. Також потрібна мікроконтролерна система керування електрооптичними характеристиками, яка поєднується із персональним комп'ютером (ПК).

Отже, за матеріалами розділу можна зробити наступні висновки:

1. Існують наступні методи генерації електричних НВЧ-сигналів за допомогою оптичного випромінювання:

1) змішування на фотодіоді випромінювання двох лазерних діодів, синхронізованих за допомогою оптичної інжекції модульованого випромінювання від задавального лазерного діода;

2) змішування на фотодіоді випромінювання двох лазерних діодів, синхронізованих за допомогою ланцюга зворотного зв'язку;

3) змішування на фотодіоді двох потоків випромінювання з різними частотами, які з'явилися після проходження випромінювання лазерного діода через інтегрально-оптичний інтерферометр Маха–Цендера, керований напругою НВЧ;

4) використання оптоелектронного генератора на основі інтерферометра Маха–Цендера, охопленого зворотним зв'язком.

2. Для розробки ефективного оптичного каналу зв'язку використання подібних елементарних схем є недостатнім.

3. Для забезпечення стабільного інформаційного сигналу потрібен ефективний стабілізатор струму/напруги для лазерного діода, реалізований за технологіями інтегральних мікросхем.

4. У оптичній системі передачі інформації потрібна мікроконтролерна система керування електрооптичними характеристиками, яка поєднується із персональним комп'ютером (ПК).

Тому, темою дипломної роботи є розробка схеми модулятора оптичного сигналу.

Для досягнення мети у роботі потрібно виконати такі завдавння:

1) на підставі аналізу існуючих систем обрати ефективну схему модуляції лазерного діода інформаційним сигналом;

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 схеми модулятора оптичного сигналу

2.1 Особливості функціювання схеми модулятора оптичного сигналу

Схема модуляції інжекційного струму лазерного діода (ЛД) базується на зміні концентрації носіїв заряду в активній зоні напівпровідника, що призводить до прямої зміни потужності вихідного випромінювання. Пряма модуляція є найпоширенішим способом передачі інформації в оптичних лініях зв'язку завдяки своїй простоті та швидкодії [1,2,16,18, 21-28].

Для реалізації такої модуляції використовують драйвери, які забезпечують два ключові компоненти струму:

Струм зміщення (I_{bias}): постійний струм, що утримує лазер у робочому режимі поблизу порогу генерації (I_{th}). Це мінімізує затримку включення та покращує лінійність.

Струм модуляції (I_{mod}): змінний інформаційний сигнал (аналоговий або цифровий), що накладається на струм зміщення [1,2,16,18, 21-28].

Типова схема модуляції складається з таких вузлів:

1. Джерело стабільного струму зміщення: зазвичай виконується на основі операційного підсилювача та транзистора (схема джерела струму), що підтримує сталий режим роботи ЛД.

2. Модулятор (Ключ або підсилювач): для цифрової модуляції часто використовується диференціальний каскад (перемикач струму), який швидко перенаправляє потік електронів через діод або в обхід нього.

3. Коло зворотного зв'язку (APC — Automatic Power Control): використовує вбудований фотодіод для контролю вихідної потужності та корекції струму при зміні температури або деградації кристала.

4. Коло узгодження (Matching circuit): необхідне при високочастотній модуляції для усунення відбиттів сигналу в лінії передачі [1,2,16,18, 21-28].

Метод збудження напівпровідникового лазерного модуля зазвичай приймає форму інжекції струму. Коли струм інжекції перевищує пороговий струм, потужність випромінювання швидко зростає зі збільшенням струму. Тому вихідну оптичну потужність напівпровідникового лазера можна регулювати, змінюючи інжекційний струм напівпровідникового лазера. Для керування напівпровідниковим лазером зазвичай використовуються автоматичні методи керування, які включають регулювання постійного струму (ACC), регулювання постійної потужності (APC) та регулювання постійної напруги (AVC) [1,2,16,18, 21-28].

У робочому режимі ACC зворотний зв'язок вибірки струму використовується для забезпечення активного керування поточним приводом, так що дрейф струму зведений до мінімуму, а стабільність виходу LD максимізується, а ефект кращий при використанні в поєднанні з контролем температури [1,2,16,18, 21-28].

У робочому режимі блок терморегуляції (БТР) і фотодетектор (ФД) використовуються для прийому невеликої частини потужності лазера і перетворення її в контрольний струм. Після того, як контрольний струм вимірюється за допомогою перетворення струм/напруга, він порівнюється із встановленим значенням через мережу зворотного зв’язку APC, щоб утворити контроль із замкненим контуром негативного зворотного зв’язку. Коли вихідна потужність лазера змінюється через температуру та інші фактори, негативний зворотний зв’язок може контролювати оптичну потужність, щоб зробити її стабільною.

AVC – це випадок, коли напруга приводу LD повинна бути постійною [1,2,16,18, 21-28].

2.2 Структурна схема модулятора оптичного сигналу

Отже, із урахуванням особливостей схем модуляції оптичного сигналу, складаємо наступну труктурну схему модулятора оптичного сигналу (рисунок 2.1.).

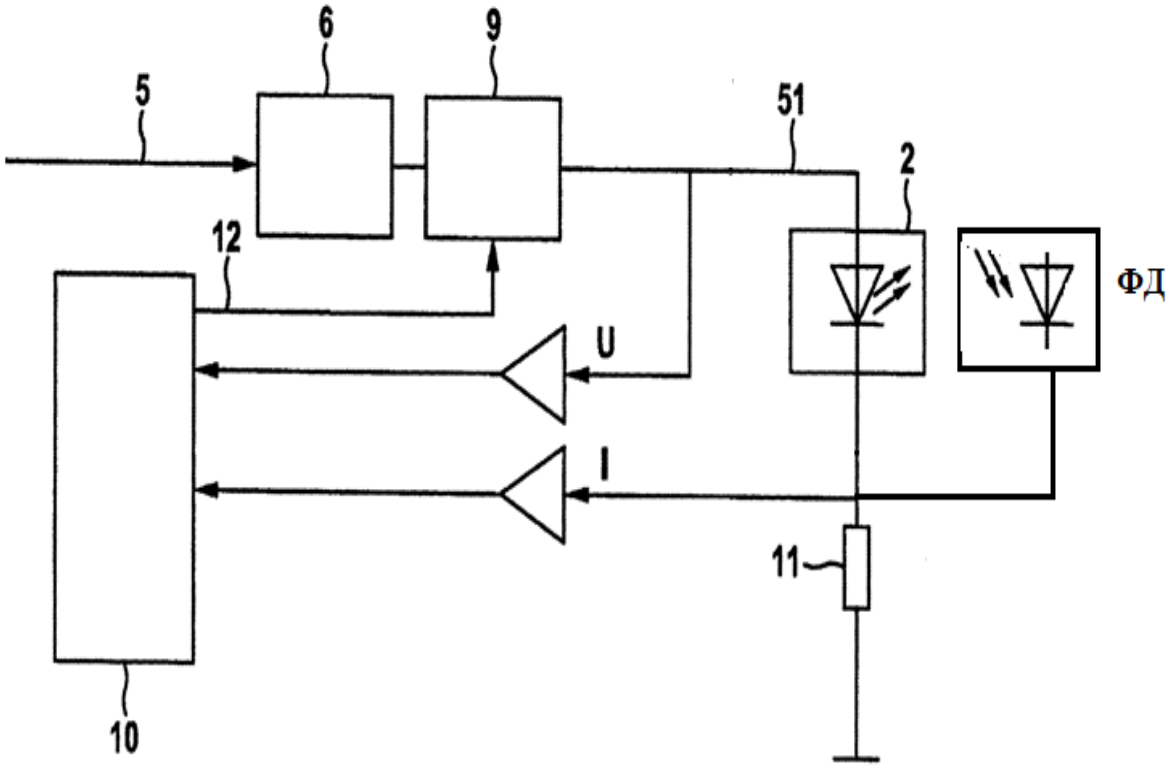


Рисунок 2.1 - Структурна схема модулятора оптичного сигналу

На рисунку 2.1 зображена пропонована схема. На вхід схеми надходить сигнал управління 5 лазерним діодом. Схема містить високочастотний модулятор 6, погоджувальну схему 9, опір (резистор) 11 і схему 10 обробки сигналів. Сигнал управління 5 лазерним діодом може бути немодульованним або вже модульованим сигналом, безперервним або переривчастим сигналом.

Високочастотний модулятор 6 генерує модулюючий сигнал, за допомогою якого модулюється сигнал управління 5 лазерним діодом. Таким чином, сигнал 5 управління лазерним діодом перетворюється високочастотним модулятором 6 і наступною за ним узгоджувальною

схемою 9 у модульований сигнал 51 управління лазерним діодом. Цей модульований сигнал 51 керує лазерним діодом 2. Вимірюється робоча напруга U та робочу силу струму I лазерного діода. На підставі робочої напруги U і робочої сили струму I лазерного діода в схемі обробки 10 сигналів обчислюється сигнал 12 добротності, що передається безпосередньо у погоджувальну схему 9.

Також, у схемі передбачений контроль потужності лазерного діода: фотодетектор (ФД) використовуються для прийому невеликої частини потужності лазера і перетворення її в контрольний струм. Після того, як контрольний струм вимірюється за допомогою перетворення струм/напруга, він порівнюється із встановленим значенням через мережу зворотного зв'язку АРС, щоб утворити контроль із замкненим контуром негативного зворотного зв'язку. Коли вихідна потужність лазера змінюється через температуру та інші фактори, негативний зворотний зв'язок може контролювати оптичну потужність, щоб зробити її стабільною.

На рисунках 2.2 – 2.5 представлено варіанти виконання узгоджувальних схем.

На рисунку 2.2 представлена узгоджувальна схема 9 з транзистором 501, двома регульованими ємностями 502, 504 і регульованою індуктивністю 503 у вигляді пропорційно-інтегруючої ланки. Пропорційно-інтегруюча ланка є формою виконання фільтра нижніх частот і заданим чином перетворює відношення струму і напруги.

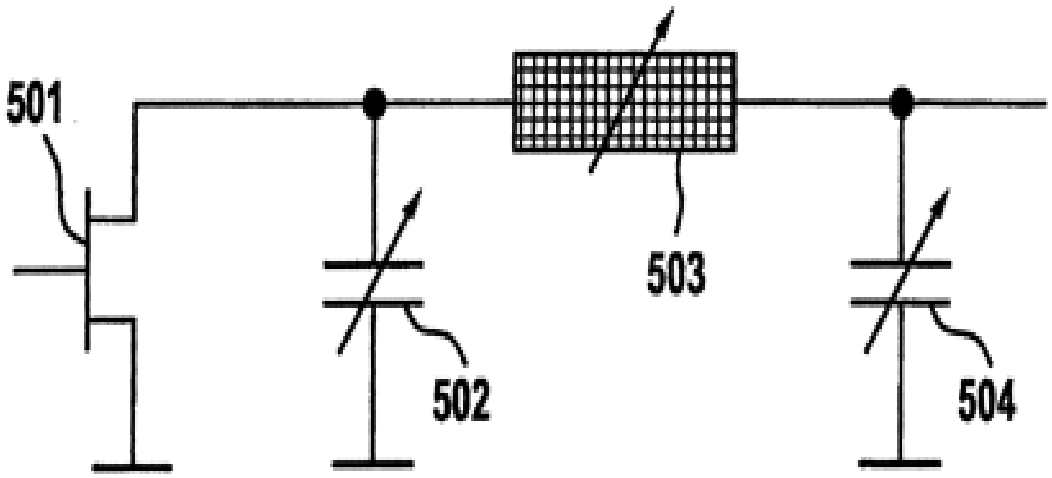


Рисунок 2.2 – Узгоджувальна схема на транзисторі з ємністю

На рисунку 2.3 представлена ще одна узгоджувальна схема 9 з трьома паралельно включеними транзисторами 505, причому три крапки на кресленні означає можливість застосування додаткових паралельно включених транзисторів. За допомогою цієї схеми встановлюється змінний рівень повного опору. Для цього, залежно від необхідного рівня повного опору, підключаються або відключаються кілька транзисторів.

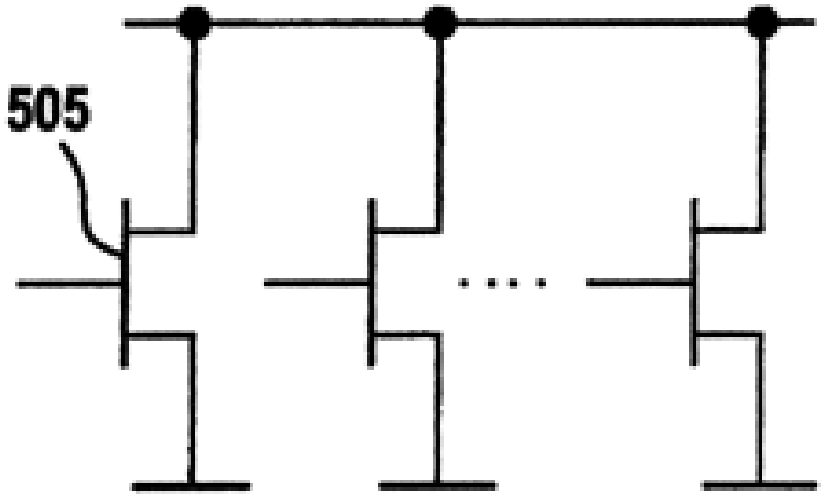


Рисунок 2.3 - Узгоджувальна схема з паралельним включенням транзисторів

На рисунку 2.4 представлений ще один елемент узгоджувальної схеми 9 з індуктивністю 506, що підключається або відключається за допомогою вимикача 507. За допомогою цього пристрою реактивну складову повного опору можна змінювати величину індуктивності. Послідовне включення кількох елементів забезпечує можливість ступінчастого регулювання реактивної складової повного опору.

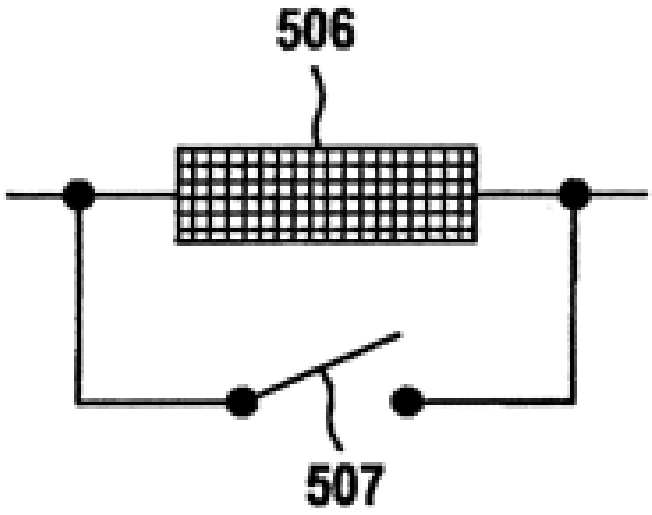


Рисунок 2.4 - Узгоджувальна схема з індуктивністю

На рисунку 2.5 показаний ще один елемент узгоджувальної схеми 9 з трьома паралельно включеними ємностями 509, кожна з яких підключається і вимикається вимикачем 508. Трикрапка на кресленні означає можливість застосування додаткових ємностей. Паралельне включення ємностей також дозволяє ступінчасто регулювати реактивну складову повного опору.

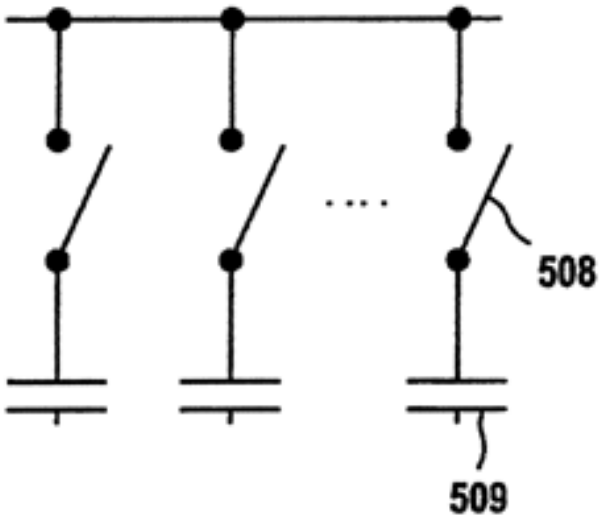


Рисунок 2.5 - Узгоджувальна схема із паралельними ємностями

2.3 Джерело випромінювання

2.3.1 Напівпровідникові лазери поверхневого випромінювання (VCSEL)

Для забезпечення ефективного оптичного зв’язку найбільш привабливими є довжини хвиль 0,7 – 1,5 мкм. Тому, для джерела світла обираємо напівпровідниковий лазер із довжиною хвилі випромінювання саме в межах цього діапазону [21].

Напівпровідникові лазери інфрачервоного (ІЧ) діапазону з високою стабільністю випромінювання — це джерела світла, що базуються на p-n - переходах, які забезпечують вузьку лінію випромінювання та мінімальні коливання потужності в часі. Вони широко використовуються в прецизійних вимірюваннях, спектроскопії, волоконно-оптичних системах та медицині [21].

Для досягнення високої стабільності (стабілізації частоти/довжини хвилі та потужності) на сьогодні кращу стабільність довжини хвилі при зміні температури було досягнуто у технології VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) – технологія напівпровідникових лазерів поверхневого випромінювання [29].

Вертикальні резонаторні поверхнево-випромінюючі лазери (VCSEL) стали ключовими компонентами оптичних систем зв'язку завдяки своїм унікальним властивостям та широкому застосуванню. На відміну від традиційних лазерів з торцевим випромінюванням, VCSEL випромінює світло перпендикулярно до поверхні напівпровідникового чіпа, що дозволяє легше інтегрувати його в компактні системи та полегшує створення масивів високої щільності [29]..

На рисунку 2.6 представлений принцип роботи напівпровідникового лазера поверхневого випромінювання [29].

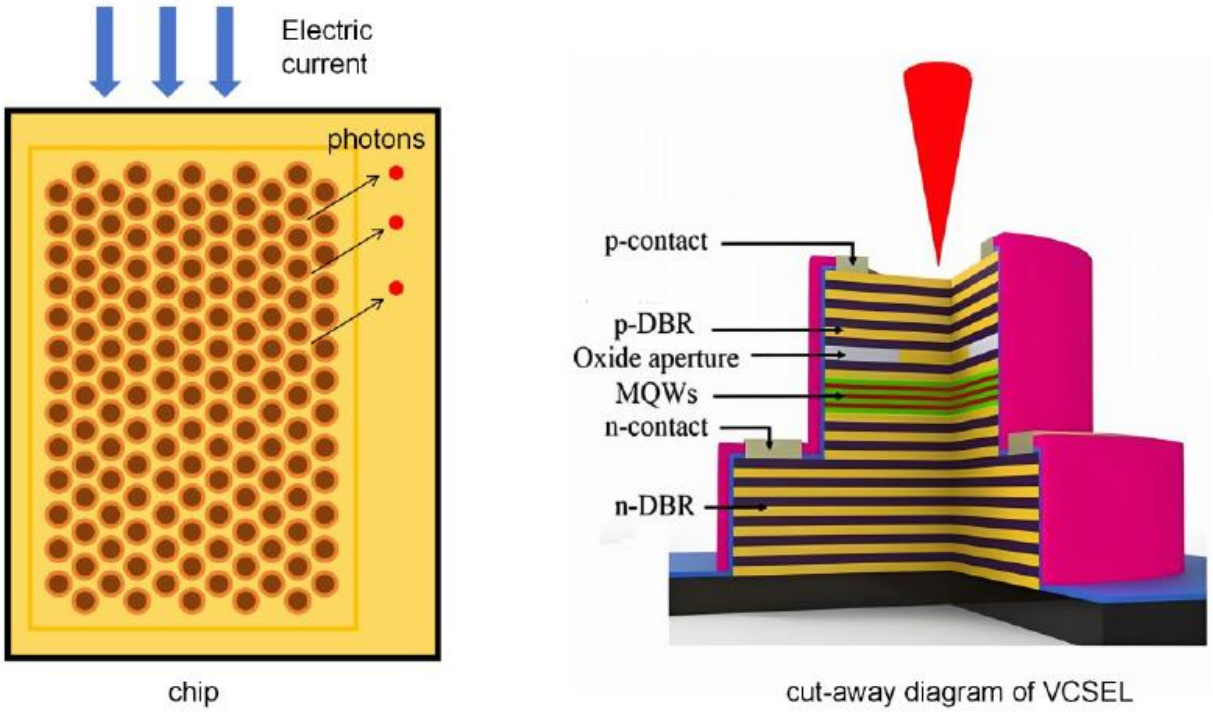


Рисунок 2.6 - Принцип роботи напівпровідникового лазера поверхневого випромінювання

VCSEL мають три елементи збудження: інверсію числа частинок, джерело накачування та резонатор. Його робота базується на наступних

принципах: коли струм проходить через електродний шар, електрони та дірки рекомбінують в активній області квантової ями, утворюючи екситони. Ці екситони захоплюються квантовою ямою та вивільняють енергію через створення фотонів. Згодом фотони безперервно відбиваються в області від квантової ями до брегівських дзеркал з обох боків. Завдяки здатності розподілених брагівських дзеркал вибирати певні режими коливань, у резонаторі досягаються лише певні резонансні частоти. Після того, як коефіцієнт підсилення перевищує поріг, фотони випромінюються через світлове вікно або виріз зверху, створюючи лазерний вихід. Варто зазначити, що VCSEL пропонує високу ефективність, низьке енергоспоживання та стабільність завдяки надзвичайно тонкій товщині активної області та особливій архітектурі резонатора [29].

Однак, незважаючи на певний прогрес у розвитку оптичних комунікаційних технологій, вони водночас стикаються з низкою проблем. Зі збільшенням масштабів систем оптичного зв'язку в систему вводиться більше джерел світла та оптичних шляхів, що збільшує споживання енергії та тепловиділення. Особливо в великомасштабних центрах обробки даних, ефективне управління споживанням енергії та теплом стає нагальним завданням. Крім того, надійність та стабільність систем зв'язку також потребує уваги [29].

На сьогодні пристрої, у яких реалізоване високостабільне випромінювання напівпровідникових лазерів, мають складну схемотехніку та значні габаритні розміри. На рисунку 2.7 представлений контролер випромінювання лазерного діода фірми ALPHALAS [30].



Рисунок 2.7 - Контролер випромінювання лазерного діода фірми ALPHALAS

Як альтернатива таким випромінювачам можуть стати лазерні діоди з вбудованим фотодіодом моніторингу.

2.3.2 Лазерний світлодіод з вбудованим фотодіодом моніторингу

Лазерний світлодіод (лазерний діод) з вбудованим фотодіодом моніторингу (Monitor Photodiode, MPD) — це пристрій, де в одному корпусі розміщено напівпровідниковий лазер та детектор світла. Фотодіод вловлює частину випромінювання (зазвичай з тильної грані лазерного кристала) і

використовується для стабілізації потужності лазера через схему зворотного зв'язку (APC — Automatic Power Control) [31].

Лазери дуже чутливі до температури. Фотодіод дозволяє драйверу автоматично коригувати струм, щоб яскравість залишалася незмінною. Якщо лазер починає деградувати або перегріватися, зміна струму моніторингу сигналізує системі про необхідність вимкнення. Контроль потужності запобігає роботі на граничних режимах, що продовжує "життя" діода [31].

На рисунку 2.8 представлена типова блок-схема лазерного світлодіода з вбудованим фотодіодом моніторингу [31].

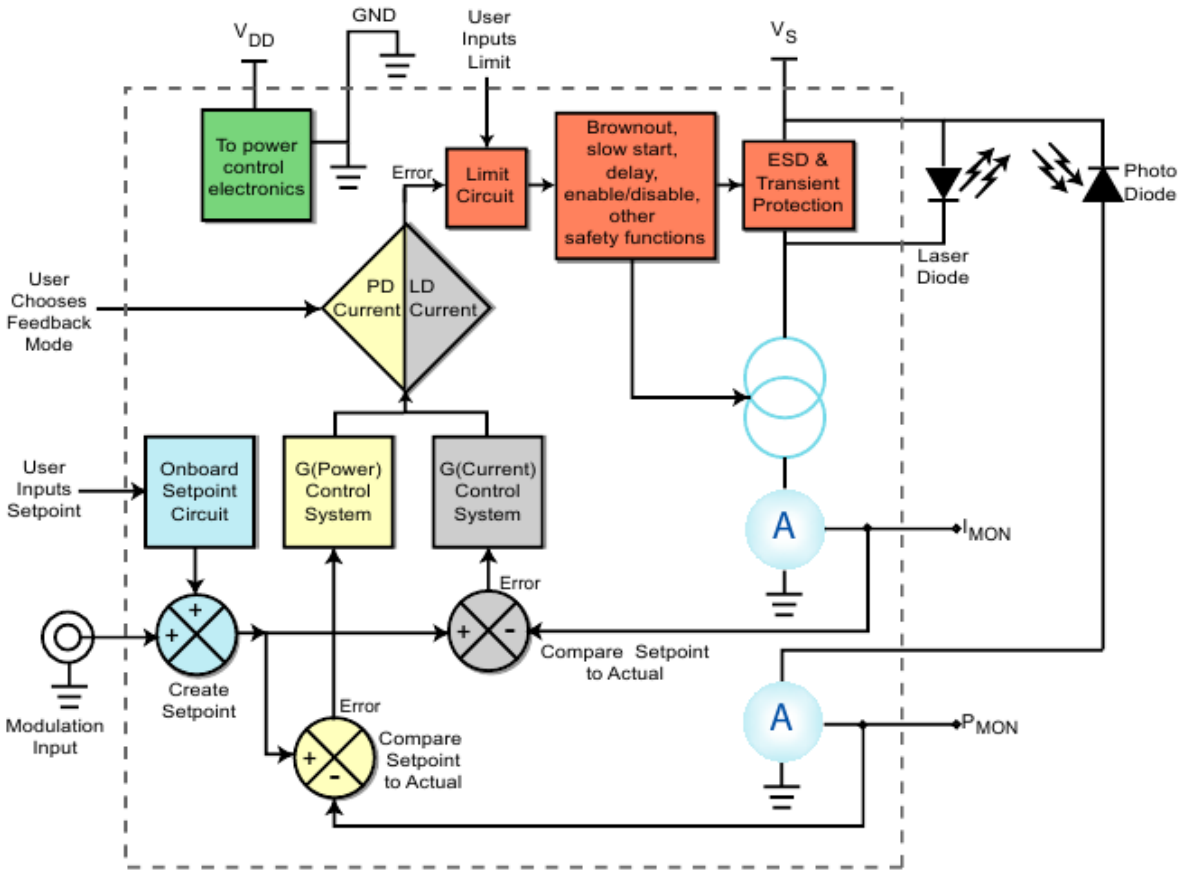


Рисунок 2.8 - Типова блок-схема лазерного світлодіода з вбудованим фотодіодом моніторингу

Однією з ключових частин драйвера лазерного діода є регульоване джерело струму. Його також можна назвати вихідним каскадом. Ця частина реагує на дії системи керування, подаючи струм на лазерний діод. На блок-схемі лазерний діод розташований між напругою живлення та джерелом

струму. Інші драйвери лазерних діодів розміщують лазерний діод між джерелом струму та землею. Залежно від конфігурації лазерного діода та заземлення, один підхід може бути кращим за інший. Це частина, де користувач підключає лазерний діод та/або фотодіод до схеми [31].

Користувацькі вхідні дані включають граничне задане значення (виражене максимальним струмом лазерного діода, дозволеним для лазерного діода), робоче задане значення та те, чи є керуючою змінною струм лазерного діода чи струм фотодіода. Крім того, якщо потрібне дистанційне задане значення, зазвичай доступний аналоговий модуляційний вхід [31].

Живлення має бути забезпечене для керуючої електроніки та джерела струму. Це може бути джерело постійного струму (деякі драйвери використовують одинарні входи живлення, інші використовують подвійні джерела живлення), або роз'єм та кабель входу змінного струму. У деяких випадках, коли для лазерного діода потрібна вища напруга, можуть бути доступні окремі входи джерела постійного струму для живлення керуючої електроніки від джерела низької напруги +5 В, а лазерного діода - від джерела вищої напруги [31].

Довжина хвилі визначає три різні конфігурації виводів лазерного діода/фотодіода. Деякі драйвери лазерних діодів універсальні, тоді як інші специфічні для підключення лазерного діода.

Після проведеного аналізу компонентної бази лазерних світлодіодів з вбудованим фотодіодом моніторингу, для подальшої розробки було обрано світлодіоди Sony SLD серії **(**Superluminescent Diode) - суперлюмінесцентні діоди [32].

2.3.3 Світлодіоди Sony SLD

SLD-діоди мають ширшу смугу модуляції, ніж звичайні LED. Сучасні дослідження показують можливість передачі даних на швидкостях від 1 Гбіт/с і вище (наприклад, до 1.3 Гбіт/с при OOK-модуляції).

Завдяки низькій когерентності вони не створюють "крапчастої" картини (спеклів), що критично для систем VLC (Visible Light Communication / Li-Fi) та передачі через мультимодове волокно, оскільки це зменшує помилки від інтерференції.

Вбудований фотодіод (PD) дозволяє підтримувати постійну середню потужність сигналу (APC — Automatic Power Control), що важливо для уникнення дрейфу логічних рівнів "0" та "1" при зміні температури. Фотодіод у корпусі SLD не призначений для прийому даних від зовнішнього джерела. Він "дивиться" на задню грань кристала самого діода. Його завдання — лише контроль потужності випромінювача. Для прийому даних на іншому кінці лінії потрібен окремий швидкісний PIN-фотодіод або APD.

Оскільки спектр SLD ширший (10–50 нм), ніж у лазера (<1 нм), вони сильніше страждають від хроматичної дисперсії в довгому оптичному волокні. Це обмежує дальність передачі порівняно з лазерами.

SLD працюють при високих струмах. Для стабільної передачі даних обов’язково потрібне гарне охолодження, інакше швидкість деградує [32].

У якості світлодіода з вбудованим фотодіодом моніторингу обираємо модель SLD323V (рисунок 2.9) [32].

SLD323V – це потужний лазерний діод з керованим підсиленням, виготовлений методом металоорганічного хімічного осадження з парової фази. Цей лазерний діод має високу вихідну яскравість із подвоєною оптичною щільністю, що може бути досягнуто завдяки структурі квантової ями - гетероструктури з роздільним обмеженням

Характеристики:

Висока потужність

Рекомендована вихідна оптична потужність: Po = 1,0 Вт

Низький робочий струм: Iop = 1,4 A (Po = 1,0 Вт)

Лазерний діод зі структурою квантових ям GaAlAs

Абсолютні максимальні номінальні значення (Tc = 25°C):

Вихідна оптична потужність Po - 1,1 Вт

Зворотна напруга VR LD - 2 В, PD - 15 В

Робоча температура (Tc) –10 до +30 °C

Температура зберігання Tstg –40 до +85 °C

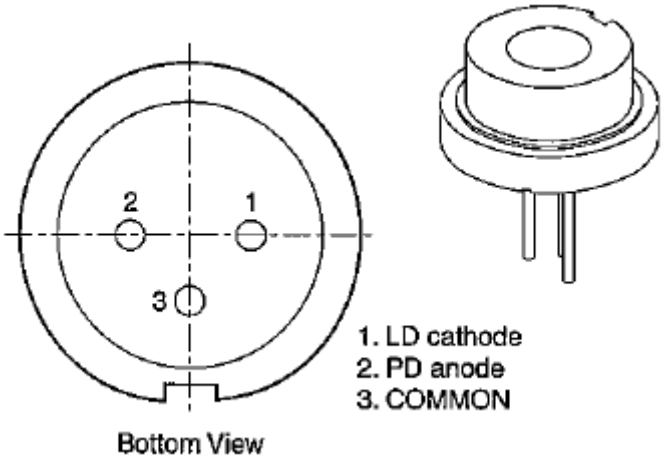


Рисунок 2.9 - Світлодіод SLD323V з вбудованим фотодіодом

Випромінювання світлодіода заходиться в потрібному для нас діапазоні 795 – 810 нм. На рисунку 2.10 представені спектральні характеристики світлодіода SLD323V.

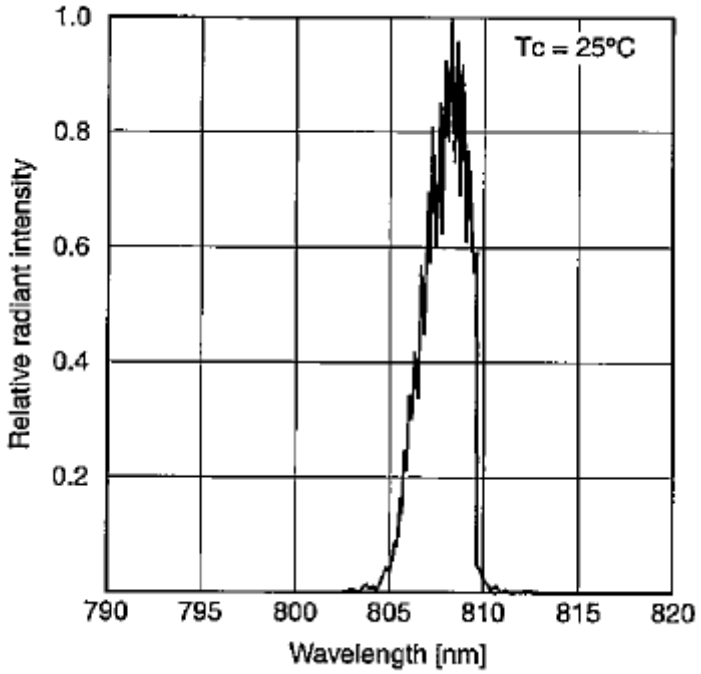


Рисунок 2.10 - Спектральні характеристики світлодіода SLD323V

Як видно із графіка випромінювання має стабільні параметри у потрібному для нас діапазоні. Але, поява незначних кластерів може привести до погіршення параметрів. Це негативно позначиться на якості інформативного сигналу. Тому, у конструкції світлодіода передбачений фотодіод моніторингу, який при погіршенні параметрів потужності світлодіода повинен через ланку зворотного зв'язку забезпечити необхдний рівень стабільності. Для забезпечення надійного зворотнього зв'язку у роботі представлена відповідна мікроконтролерна система.

2.4 Мікроконтролерна система зворотнього зв'язку модулятора оптичного сигналу

2.4.1 Схема регулювання постійної середньої потужності сигналу

У якості регулятора постійної середньої потужності сигналу обираємо мікросхему MAX3669 [33].

MAX3669 — це повноцінний лазерний драйвер +3,3 В зі схемою автоматичного керування потужністю (APC) для застосувань SDH/SONET зі швидкістю передачі даних до 622 Мбіт/с. Він приймає диференціальні входи PECL, забезпечує струми зміщення та модуляції та працює в діапазоні температур від -40°C до +85°C.

На рисунку 2.11 представлена функціональна схема MAX3669[33].

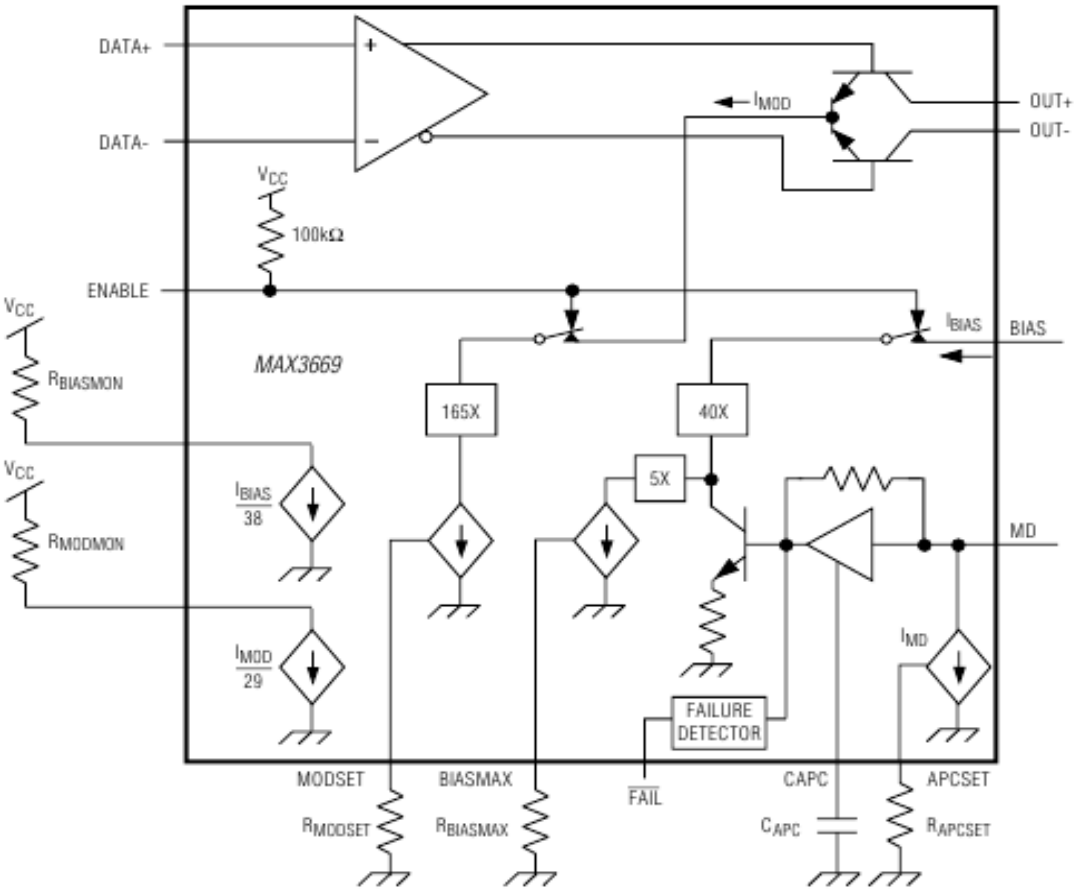


Рисунок 2.11 - Функціональна схема MAX3669

Вбудована петля зворотного зв'язку APC для підтримки постійної середньої оптичної потужності в залежності від температури та терміну служби. Широкий діапазон струму модуляції від 5 мА до 75 мА та струм зміщення від 1 мА до 80 мА легко програмувати, що робить цей продукт ідеальним для використання в різних застосуваннях SDH/SONET. Передбачено два виводи для контролю рівнів струму в лазері: BIASMON зі струмом, пропорційним струму зміщення лазера, та MODMON зі струмом, пропорційним модуляції лазера.

MAX3669 також забезпечує керування ввімкненням та вихід моніторингу несправності, щоб вказати, коли петля APC не в змозі підтримувати середню оптичну потужність. MAX3669 доступний у 24-вивідному тонкому корпусі QFN розміром 4 мм x 4 мм та 32-вивідному корпусі TQFP розміром 5 мм x 5 мм.

Для підтримки постійної середньої оптичної потужності, MAX3669 містить контур APC для компенсації змін порогового струму лазера залежно від температури та терміну служби. Фотодіод на задній грані, встановлений у лазерному корпусі, використовується для перетворення оптичної потужності у фотострум.

Контур APC регулює струм зміщення лазера таким чином, щоб струм монітора відповідав опорному струму, встановленому RAPCSET. Постійна часу контуру APC визначається зовнішнім конденсатором (CAPC). Щоб усунути залежне від шаблону тремтіння, пов'язане з постійною часу контуру APC, та гарантувати стабільність контуру, рекомендоване значення для CAPC становить 0,1 мкФ.

Коли контур APC працює, максимально допустимий струм зміщення встановлюється зовнішнім резистором RBIASMAX.

Прапорець відмови APC (FAIL) встановлюється на низький рівень, коли струм зміщення більше не може регулюватися для досягнення бажаної середньої оптичної потужності.

Робота APC із замкнутим контуром вимагає від користувача встановлення трьох струмів за допомогою зовнішніх резисторів, підключених між землею та BIASMAX, MODSET та APCSET.

2.4.2 Мікроконтролер узгодження модульованого оптичного сигналу і струму світлодіода

Як було зазначено вище, система підтримки постійної середньої оптичної потужності може бути застосована для використання в різних застосуваннях SDH/SONET.

SDH (Synchronous Digital Hierarchy) та SONET (Synchronous Optical Networking) — це стандартизовані протоколи для високошвидкісної передачі даних через волоконно-оптичні кабелі, що використовуються в магістральних мережах зв'язку. Вони забезпечують синхронізацію, надійність, гнучке мультиплексування потоків (від E1/T1 до Gigabit Ethernet) та автоматичне перемикання на резервні канали у разі аварій [34]. Дані протоколи повністю відповідають поставлним задачам розробки.

Тому, для забезпечення сполучення інформаційного сигналу із модуляцією випромінювання лазерного світлодіода потрібно врахувати можливість керування системою зовні за допомогою ПК, а також відповідності до протоколів SDH) та SONET.

Для подальшої схемотехнічної реалізації було обрано мікросхему MAX3693 (рисунок 2.11) [33].

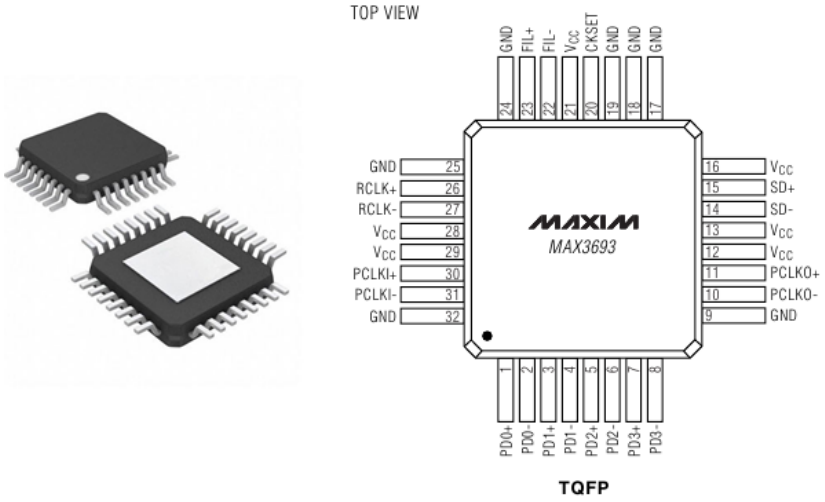
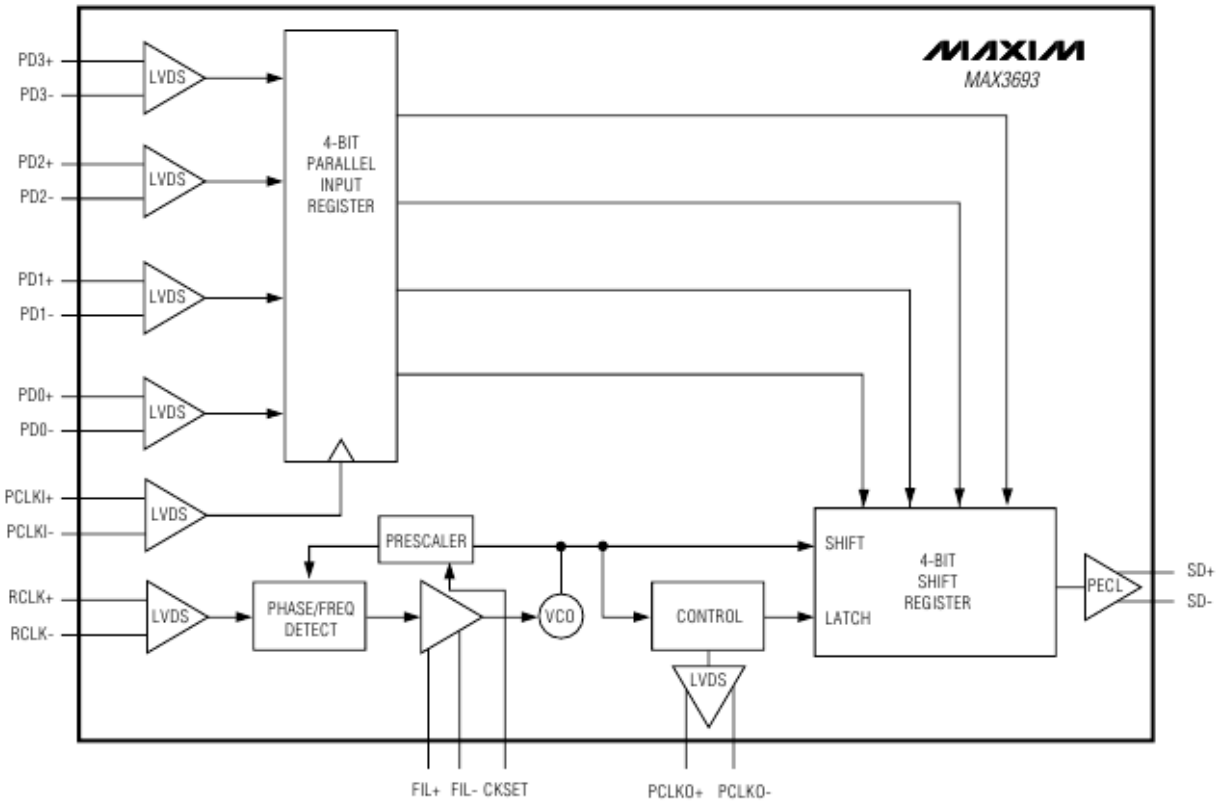


Рисунок 2.11 - Мікросхема MAX3693

Мікросхема MAX3693 ідеально підходить для перетворення 4-бітних паралельних даних зі швидкістю 155 Мбіт/с у послідовні дані зі швидкістю 622 Мбіт/с у застосунках ATM та SDH/SONET. Працюючи від одного джерела живлення +3,3 В, цей пристрій приймає низьковольтні диференціальні сигнали (LVDS) та входи даних для взаємодії з високошвидкісними цифровими схемами та забезпечує вихід послідовних даних PECL 3,3 В. Повністю інтегрована система PLL синтезує внутрішній послідовний тактовий сигнал зі швидкістю 622 Мбіт/с з опорного тактового сигналу 155,52 МГц, 77,76 МГц, 51,84 МГц або 38,88 МГц [33].

На рисунку 2.12 представлена структурна схема MAX3693



Рмсунок 2.12 - Структурна схема MAX3693

Мікросхема MAX3693 містить 4-бітний паралельний вхіднийрегістр, 4-бітний регістр зсуву, логіку керування та синхронізації, вихідний буфер PECL, буфери введення/виведення LVDS та частотно-синтезуючу PLL (що складається з фазового/частотного детектора, контурного

фільтра/підсилювача, генератора з керованою напругою та попереднього дільника). Цей пристрій перетворює 4-бітні дані зі швидкістю 155 Мбіт/с на послідовні дані зі швидкістю 622 Мбіт/с. PLL синтезує внутрішній опорний сигнал 622 Мбіт/с, який використовується для синхронізації вихідного регістра зсуву. Цей тактовий сигнал генерується шляхом синхронізації із зовнішнім опорним тактовим сигналом (RCLK) 155,52 МГц, 77,76 МГц, 51,84 МГц або 38,88 МГц [33].

Вхідні паралельні дані синхронізуються в MAX3693 на зростаючому переході паралельного тактового вхідного сигналу (PCLKI). Логіка керування та синхронізації забезпечує належну роботу, якщо регістр паралельного входу фіксується в межах часового вікна, визначеного відносно до вихідного сигналу паралельного тактового сигналу (PCLKO). PCLKO – це синтезований внутрішній послідовний тактовий сигнал зі швидкістю 622 Мбіт/с, поділений на чотири. Допустима амплітуда PCLKO до PCLKI становить від 0 до +4 нс. Це визначає часове вікно приблизно на наростаючому фронті PCLKO, протягом якого може виникнути наростаючий фронт PCLKI [33].

У подальшому мікросхема підключається до персонального комп’ютера для програмування параметрів функціональних блоків, забезпечення електронного кодування інформації, корегування сигналів системи зворотнього зв’язку із параметрами оптичного інформаційного сигналу.

Остаточно електрична схема модулятора оптичного сигналу представлена на рисунку 2.13.

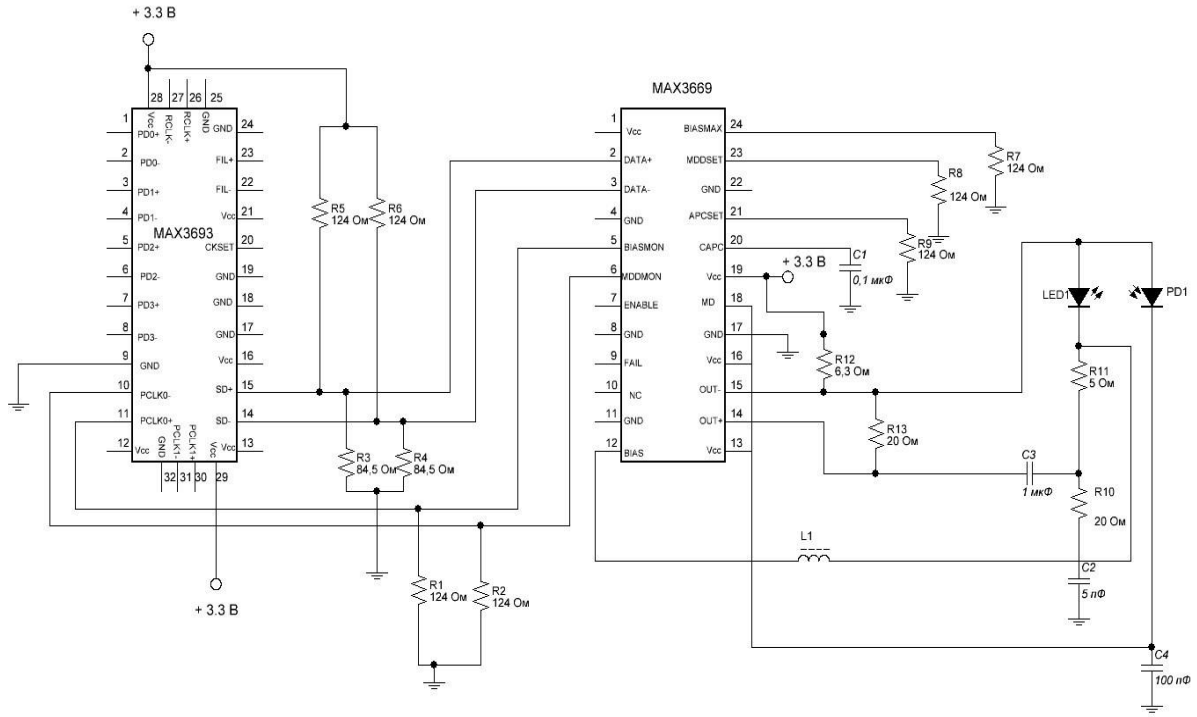


Рисунок 2.13 - Електрична схема модулятора оптичного сигналу

2.5 Моделювання роботи лазерного світлодіода з вбудованим фотодіодом моніторингу

Перевірку центрального функціонального блоку схеми - лазерного світлодіода з вбудованим фотодіодом моніторингу – проводили за допомогою програми LTSpice компанії Analog Devices Inc. (USA, Wilmington [35].

Основний елемент дослідження (лазерний світлодвод із вбудованим фотодіодом моніторингу), для спрощення схемотехнічного навантаження моделі, замінили оптроном PC817C [35].

На рисунку 2.14 представлена схема лазерного світлодіода з вбудованим фотодіодом моніторингу.

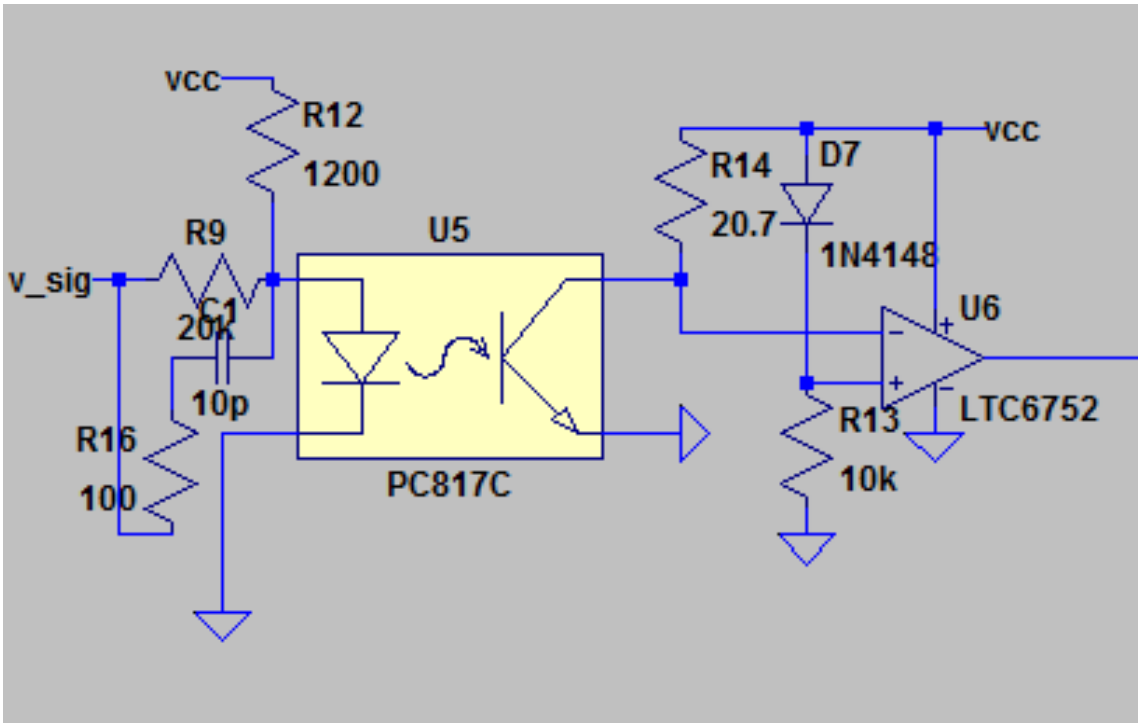
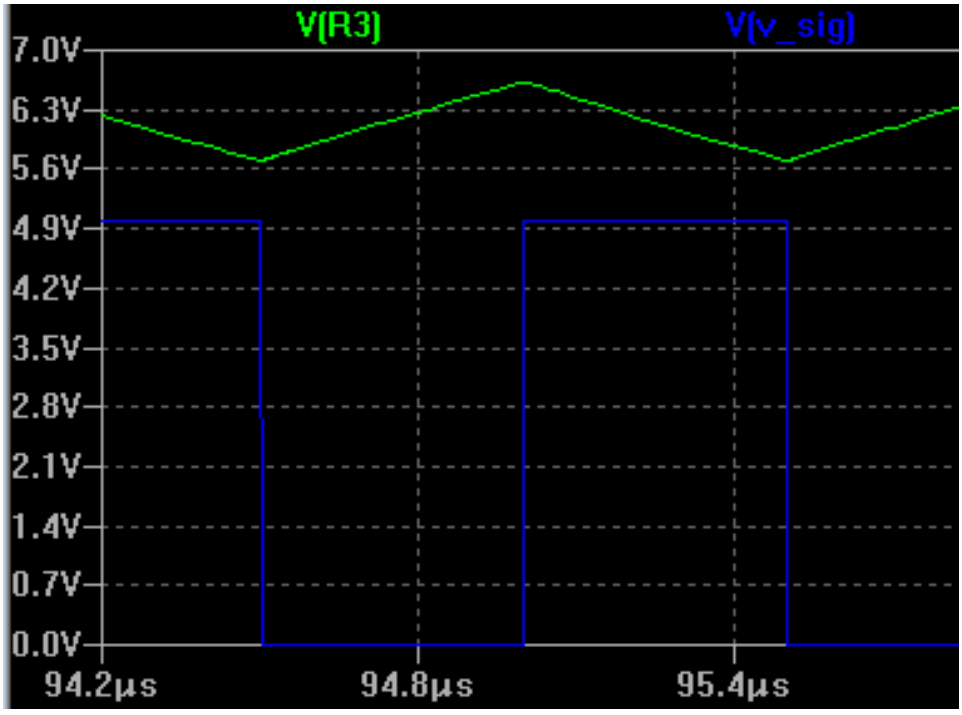


Рисунок 2.14 - Схема лазерного світлодіода з вбудованим фотодіодом моніторингу

На рисунку 2.15 представлені результати моделювання пристрою.



Рисуноок 2.15 – Результати моделювання роботи лазерного світлодіода з вбудованим фотодіодом моніторингу в редакторі LTSpice

Як видно із графіка, при виникненні насабільності сигналу на світлодіоді (зелений графік), відкорегований мікроконтролерною схемою сигнал (синій графік), має достаньо стабільний характер.

2.6 Терморегульований енергонезалежний змінний резистор DS1858

В подальшому, для збільшення точності вимірування струмових характеристик лазерного світлодіода, та для зменшення температурного впливу навколишнього середовища, пропонується додати до схеми енергонезалежний змінний резистор DS1858. На рисунку 2.16 представлений резистор DS1858, виготовлений за IMC технологією [33].

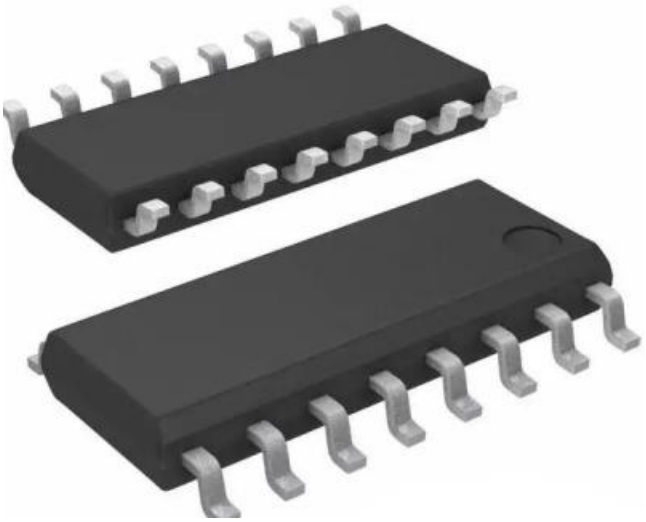


Рисунок 2.16 - Енергонезалежний змінний резистор DS1858

На рисунку 2.17 представлена структурна схема змінного резистора DS1858.

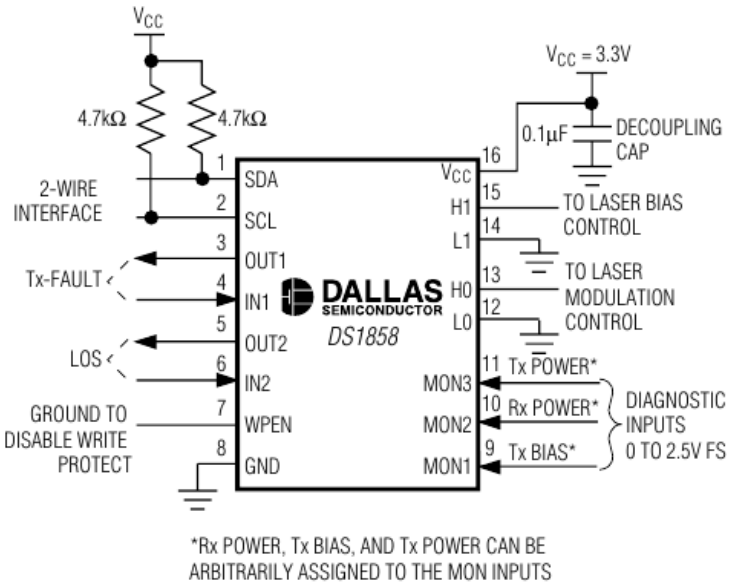


Рисунок 2.17 - Структурна схема змінного резистора DS1858

Змінний резистор DS1858 з трьома моніторами складається здвох лінійних змінних резисторів 50 кОм на 256 позицій, трьох аналогових моніторингових входів (MON1, MON2, MON3) та датчика температури прямого цифрового перетворення. Пристрій забезпечує ідеальний метод для встановлення та температурної компенсації напруг та струмів зміщення в системах керування використовуючи мінімальну схему. Налаштування змінного резистора зберігаються в пам'яті EEPROM і доступні через 2-провідну послідовну шину [33].

Отже, за матеріалами розділу можна зробити наступні висновки:

1) у пристрої застосовано пряму модуляцію оптичного інформаційного сигналу;

2) для досягнення високої стабільності оптичного сигналу у роботі використовується лазерний світлодіод поверхневого випромінювання;

3) у роботі використовується лазерний світлодіод SLD323V з вбудованим фотодіодом моніторингу (Monitor Photodiode, MPD). Фотодіод вловлює частину випромінювання і використовується для стабілізації потужності лазера через схему зворотного зв'язку;

4) для забезпечення надійного зворотнього зв’язку у роботі представлена відповідна мікроконтролерна система на основі мікросхеми MAX3669 - регулятора постійної середньої потужності сигналу;

5) для забезпечення сполучення інформаційного сигналу із модуляцією випромінювання лазерного світлодіода, а також для можливості керування системою зовні за допомогою ПК, обрано мікросхему MAX3693;

6) результати моделювання роботи схеми за допомогою програми LTSpice компанії Analog Devices Inc. показали добру відповіність до поставлених у роботі завдань;

7) у подальшому, для збільшення точності вимірування струмових характеристик лазерного світлодіода, та для зменшення температурного впливу навколишнього середовища, пропонується додати до схеми енергонезалежний змінний резистор DS1858.

3 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем розробка схеми модулятора оптичного сигналу

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Роботи, що проводяться в дослідницькій лабораторії, не представляють великої небезпеки, оскільки приміщення кафедри належать до приміщень без підвищеної небезпеки. Проте використання електроустаткування може нести в собі ряд шкідливих і небезпечних для життя і здоров'я людей чинників, що працюють з ним. Основну небезпеку дослідницької лабораторії представляють використання електроприладів, які працюють при напрузі небезпечній для життя.

Дія електричного струму на живу тканину носить своєрідний характер. Проходячи через організм, електричний струм виробляє термічну, електролітичну і біологічну дію [36,37].

Міра небезпечної і шкідливої дії на людину електричного струму і електричної дуги залежить від роду і величини напруги струму, частоти струму, шляху струму через тіло організму, тривалість дії електричного струму, умов зовнішнього середовища.

У дослідницькій лабораторії існує можливість виникнення небезпеки при роботі з шкідливими речовинами в процесі моделювання плати пристрою. При монтажі електронних плат застосовують ацетон, спирт для знежирення і очищення від пилу мікросхеми, а також олово і каніфоль для припаювання ніжок напівпровідникового приладу до плати.

Спирт, ацетон викликає сухість шкіри. При систематичному вдиханні можливі захворювання сітківки ока. Також можливі нирково-психічні захворювання.

Каніфоль дратівливо діє на слизисті оболонки дихальних шляхів і на шкіру, що наводить до дерматитів.

При недостатній освітленості на робочому місці може виникнути зорова втома.

3.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

При розробці оптосхематичної системи значна частина робіт повинна бути виконана на комп’ютері – програмування мікроконтролера пристрою. Тривала робота перед екраном монітора наводить до різних функціональних розладів організму, не говорячи вже про неймовірне навантаження на очі. Захворювання, викликані травмою навантажень, що повторюються, не виявляються відразу, це нездужання, що поступово накопичуються. У цьому їх небезпека. В основному страждають кисті, зап'ястя, плечі, шийна область [36,37].

У виникненні хвороб такого роду найчастіше винні: погана ергономіка робочих місць, дуже високо розташована клавіатура, непідходяще крісло, незнання основних правил роботи за комп'ютером. Правила, що стосуються освітлення в приміщенні і на робочому місці, мікроклімату, розташування клавіатури прості:

- повна тривалість робочого часу, проведеного за екраном монітора із захисним екраном, для дорослого користувача не повинна перевищувати 4 години за 8-годинний робочий день;

- не рекомендується працювати на клавіатурі безперервно більше 30 хвилин, кожну годину необхідно робити п'ятихвилинну перерву, а кожні дві години - 15-хвилинний, причому краще покинути робоче місце, влаштувати розминку для пальців, зробити просту гімнастику для очей;

- для устаткування робочого місця краще використовувати спеціальні столи і стільці, що дають можливість регулювати положення всіх вузлів, - висоти столу, полички для клавіатури, крісла користувача;

- висоту клавіатури слід відрегулювати так, щоб кисть розташовувалася прямо;

- спина має бути пряма, кут між стегнами і позвоночником- теж прямий, для чого слід підібрати таке крісло, спинка якого здатна підтримувати спину користувача.

- монітор слід розташувати так, щоб нижній рівень екрану знаходився на 20…25 см нижче за рівень очей, а рівень верхньої кромки розташовувався на висоті лоба, від екрану монітора до очей має бути не менше 75…120 см.

- відстань між столами з комп'ютерами - не менше 1,5 метрів, між моніторами - не менше 2,2 метрів.

- екран комп'ютера краще розташувати під прямим кутом по відношенню до вікон, які необхідно завісити або закрити жалюзі.

3.3 Виробнича санітарія

У виробничих приміщеннях, в яких робота на відеотерміналах і персональних комп'ютерах є допоміжною, температура, відносна вологість і швидкість руху повітря на робітниках метах повинні відповідати санітарним нормам мікроклімату виробничих приміщень, що діють [36,37]

У виробничих приміщеннях, в яких робота на відеотерміналах і персональних комп'ютерах є основною (диспетчерські, операторські, розрахункові, кабінети і пости управління, зали обчислювальної техніки і ін.) повинні забезпечуватися оптимальні параметри мікроклімату відповідно до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Оптимальні норми мікроклімату для приміщень з відеотерміналами і персональними комп'ютерами

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С (не більше)	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	Легка – 1а	22-24	40-60	0.1
	Легка – 1б	21-23	40-60	0.1
Теплий	Легка – 1а	23-25	40-60	0.1
	Легка – 1б	22-24	40-60	0.2

До категорії 1а відносяться роботи, вироблювані сидячи і що не вимагають фізичної напруги, при яких витрата енергії складає до 120 ккал/ч. До категорії 1б відносяться роботи, вироблювані сидячи, стоячи або пов'язані з ходьбою і такі, що супроводяться деякою фізичною напругою, при яких витрата енергії складає від 120 до 150 ккал/год

При монтажі компонентів на плату і формуванні топологічного рисунка струмопровідного шару виникає потенційна небезпека небажаної дії на організм речовин, що обертаються в технологічному процесі, і матеріалів. Всі речовини, що забруднюють повітря, надають шкідливу дію, якщо вони потрапляють в організм в кількостях, що перевищують деяку порогову величину (ГДК). У виробництві плат застосовують певні речовини, які шкідливі для організму. Клас небезпеки шкідливих речовин встановлюється залежно від гранично допустимої концентрації речовин в повітрі робочої зони. Це та концентрація яка переноситься без відхилень від нормального полягання в перебігу робочого дня при щоденному диханні. Згідно СН 245-71 встановлюють чотири класи шкідливих речовин: 1-й клас – речовини надзвичайно небезпечні; 2-й клас – речовини високо небезпечні; 3-й клас – речовини помірно небезпечні; 4-й клас – речовини мало небезпечні. Дія токсичних речовин виявляється в гострих і хронічних отруєннях.

При монтажі електронних плат застосовують ацетон, спирт для знежирення і очищення від пилу, а також олово і каніфоль для припаювання ніжок напівпровідникового приладу до плати.

У таблиці 3.2 [36,37] приведені гранично допустимі концентрації небезпечних речовин, вживаних при монтажі елементів, згідно СН 245-71.

Таблиця 3.2 - Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони

Речовини	ГДК, мг/м^3
Ацетон	30
Каніфоль	150
Олово	90
Спирт	1000

Спирт, ацетон викликає сухість шкіри. При систематичному вдиханні можливі захворювання сітківки ока. Також можливі нервово-психічні захворювання.

Каніфоль дратівливо діє на слизисті оболонки дихальних шляхів і на шкіру, що наводить до дерматитів.

Основні засоби техніки безпеки – герметизація апаратури і устаткування, наявність припливний витяжній вентиляції в приміщенні проведення робіт і витяжна шафа для проведення експериментальних досліджень, виготовлення печатних плат і монтажу компонентів паянням (рисунок 3.1).

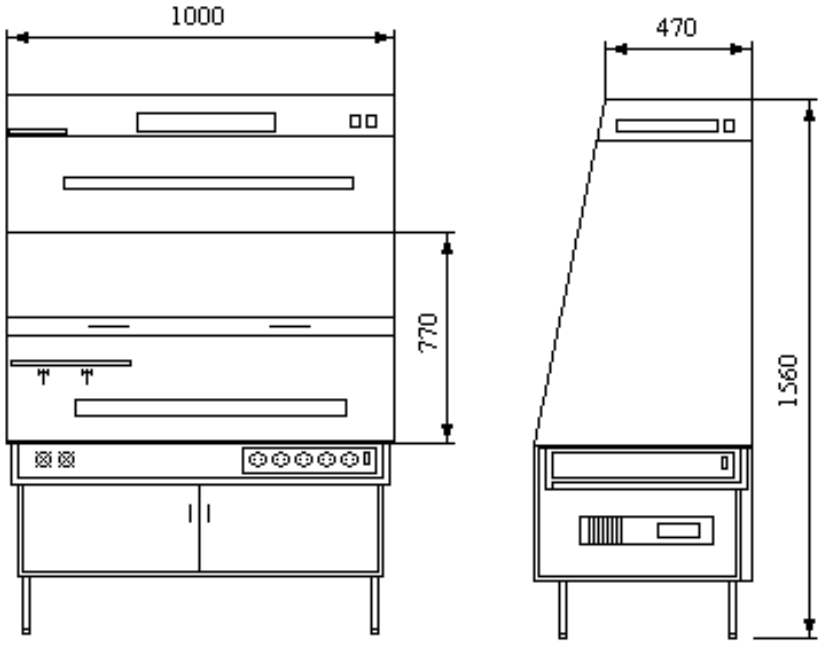


Рисунок 3.1 – Витяжна шафа для проведення експериментальних досліджень, виготовлення печатних плат і монтажу компонентів паянням

3.4 Електробезпека

Дія електричного струму на організм людини може бути теплова, хімічна і біологічна. При дії електричного струму на організм людини можуть бути два види поразки: електричні удари і електричні травми. Часто ці види супроводять один одному [36,37].

Захистом від дотику до струмопровідних частин електроустановок є ізоляція дротів, обгороджування, блокування і захисні засоби. Захистом від напруги, що з'явилася на корпусах електроустановок в результаті порушення ізоляції, є захисне заземлення, занулення і захисне відключення.

Захисне заземлення влаштовується в мережах з ізольованою нейтраллю. Воно є навмисним з'єднанням із землею неструмопровідних металевих частин електроустановок.

Захисне заземлення необхідне для зниження напруги відносно землі до безпечної величини на металевих корпусах електроустановок, що нормально не знаходяться під напругою, але що виявилися під таким в результаті пошкодження ізоляції.

При зниженні напруги на корпусах відносно землі струм, що проходить через людину, що стосується корпусу, знижується до безпечної величини (10 мА).

На ділянці проведення експерименту в лабораторії застосовується електроустаткування до 220 В. Електроживлення здійснюється від розподільних щитів за допомогою комутуючих автоматів, що виробляють захист того або іншого об'єкту.

Приміщення відноситься до приміщень без підвищеної безпеки.

Відповідно до ПЗП приміщення лабораторії відносять до класу по пожежобезпеці П-11 а. Міра захисту електроустаткування 1 Р44.

Прокладка сполучних дротів здійснюється в трубах, що забезпечує надійний захист від механічних пошкоджень дротів [36,37].

3.5 Пожежна та техногенна безпека об’єкту

Приміщення відноситься за вибухопожежною небезпекою до категорії “Б” [36,37].

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” [36,37]. Це горіння обладнання та установок, які знаходяться під електричною напругою. Серед необхідних засобів гасіння пожежі в даному приміщені є два вуглеки-

слих 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 місцевого освітлення робочого місця при монтажі елементів на плату

Згідно СНіП 23-05-95 для місцевого освітлення (у складі комбінованого освітлення) слід використовувати світильники з непрозорими відбивачами. Світильники місцевого освітлення слід розташовувати так, щоб їх елементи, що світять, не потрапляли прямо у поле зору працівників як даного так і інших робочих місць [36,37].

Вираження для освітленості даної точки “а” поверхні спостережуваного об'єкту визначається виразом:

$$E_a = \frac{J_{св}}{\lambda_{са}^{\,2}} \cos\gamma_{са}\,.$$

Тут $J_{св}$ – сила світла, що випромінюється світильником, кд/м^2; $l_{са}$ – довжина шляху світлового променя від елементу, що світить, до точки “а” спо-

стережуваного об'єкту, м; $\gamma_{ña}$ - кут, що утворюється світловим променем в напрямі від елементу, що світить, до точки “а” і нормаллю до спостережуваної поверхні в точці “а”, рад. Розташування світильника на робочому місці показане на рисунку 3.2.

У точці “а” світильник місцевого освітлення повинен створювати освітленість, рівну нормативному значенню для місцевого освітлення (в даному випадку 180 лк), з відхиленням в межах –10% … +20%.

Визначимо силу світла, потрібну від світильника місцевого освітлення:

$$x_{св} = 20см; y_{св} = 10см; z_{св} = 20см; x_a = 20см; y_a = 30см$$

$$l^*_{са} = \sqrt{(x_{св} + x_a)^2 + (y_{св} + y_a)^2} = 56{,}6см$$

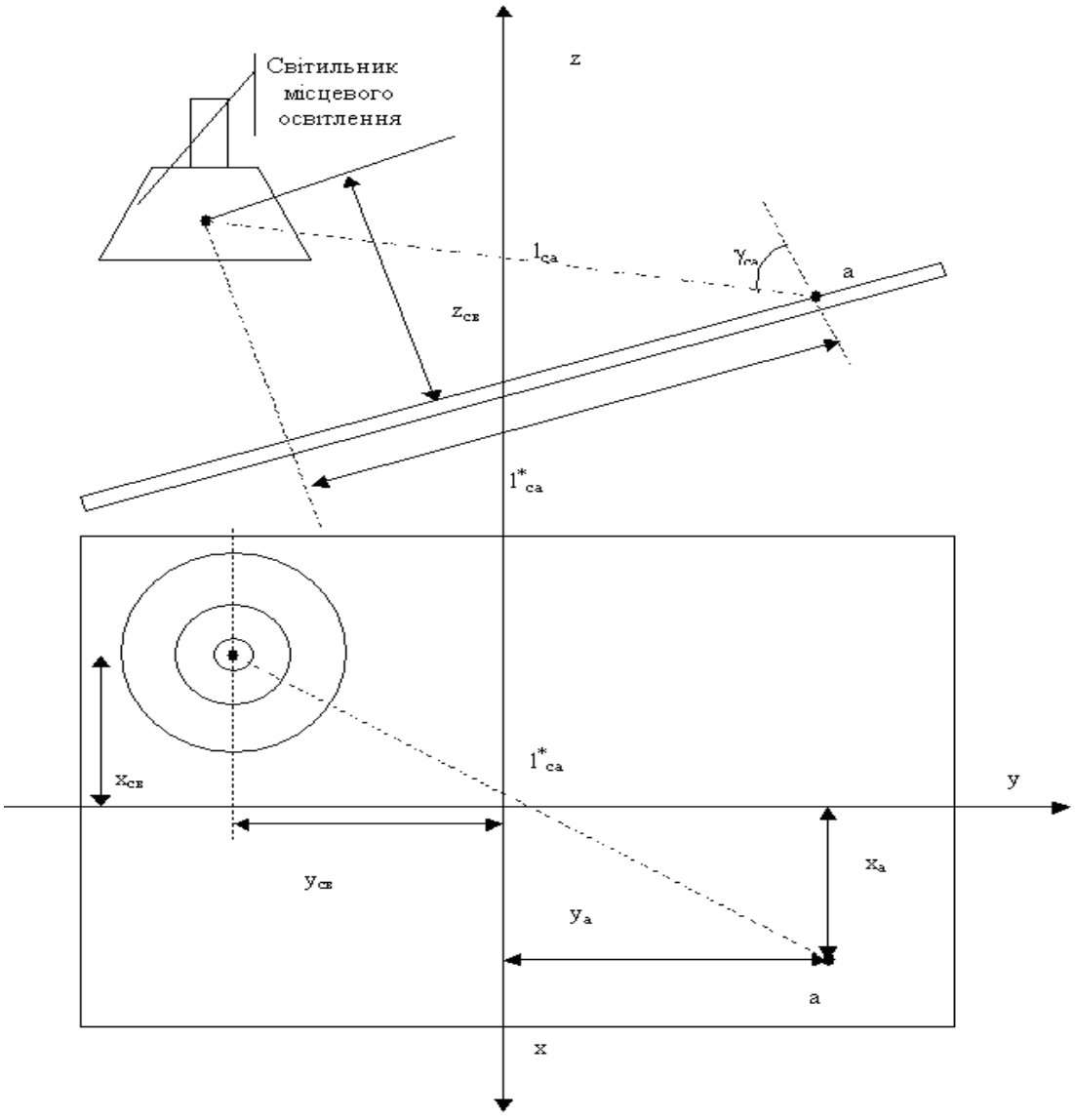


Рисунок 3.2 – Розташування світильника місцевого освітлення

$$l_{са} = \sqrt{{l^*}_{са}^{\,2} + z_{св}^{\,2}} = 60 см$$

$$\gamma_{са} = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{z_{св}}{l_{са}}\right) = 1{,}231 рад$$

У світильнику використовується лампа розжарювання, тому для вибору лампи світильника місцевого освітлення по величині створюваного світлового потоку проведемо розрахунок:

$$\Omega_{св} = 2\pi\left\{1 - \cos\left[arctg\left(\frac{d_{св}}{2h_{л}}\right)\right]\right\} = 4{,}14$$

$$\Phi_{Л} = E_{норм.м} \cdot {l_{св.а.}}^{2} \cdot \frac{4\pi}{\cos\gamma_{са}}\left[1 + \chi_{св}\rho_{св}\left(\frac{4\pi}{\Omega_{св}} - 1\right)\right]^{-1} = 796$$

З таблиці [36,37] вибираємо лампу розжарювання типа БК-215-225-60 потужністю 60 Вт.

Висновки та рекомендації

Отже, за результатами роботи можна зробити наступні висновки:

1) у пристрої застосовано пряму модуляцію оптичного інформаційного сигналу;

2) для досягнення високої стабільності оптичного сигналу у роботі використовується лазерний світлодіод поверхневого випромінювання;

3) у роботі використовується лазерний світлодіод SLD323V з вбудованим фотодіодом моніторингу (Monitor Photodiode, MPD). Фотодіод вловлює частину випромінювання і використовується для стабілізації потужності лазера через схему зворотного зв'язку;

4) для забезпечення надійного зворотнього зв’язку у роботі представлена відповідна мікроконтролерна система на основі мікросхеми MAX3669 - регулятора постійної середньої потужності сигналу;

5) для забезпечення сполучення інформаційного сигналу із модуляцією випромінювання лазерного світлодіода, а також для можливості керування системою зовні за допомогою ПК, обрано мікросхему MAX3693;

6) результати моделювання роботи схеми за допомогою програми LTSpice компанії Analog Devices Inc. показали добру відповіність до поставлених у роботі завдань;

Як рекомендації щодо розроблюваного пристрою можна відмітити наступне:

1) у подальшому, для збільшення точності вимірування струмових характеристик лазерного світлодіода, та для зменшення температурного впливу навколишнього середовища, пропонується додати до схеми енергонезалежний змінний резистор DS1858.

2) система може бути використана в подальших розробках мікроелектронних інформаційних систем;

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

Перелік посилань

1. 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», 2019. Кн. 2. 336 с.

2. Оптоелектронні інформаційні системи та волоконна й інтегральна оптика (практикуми) : навчальний посібник / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха, О. В. Пилипенко, А. О. Степаненко ; за заг. ред. Л. В. Однодворець. – Суми : Сумський державний університет, 2025. – 212 с.

3. Матвієнко М. П. Промислова електроніка. Підручник. — Київ : Видавництво Ліра-К, 2019. 633 с.

4. Корчак Ю. Оптоелектронна інформатика. Том І. Основні принципи та прилади: навчальний посібник / Ю. Корчак, Ю. Фургала, С. Рихлюк. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2016. – 406 с.

5. Christoforos Kachris and Ioannis Tomkos, "A survey on optical interconnects for data centers", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 4, pp. 1021–1036, Oct. 2012.

6. M. Uysal and H. Nouri, “Optical Wireless Communications – An Emerging Technology”, 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Graz, Austria, July 2014

7. A. Khalighi and M. Uysal, “Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective”, IEEE Communications Surveys and Tutorials.

8. A. A. Huurdeman, The Worldwide History of Telecommunications, Wiley Interscience, 2003

9. G. J. Holzmann and B. Pehrson, The Early History of Data Networks (Perspectives), Wiley, 1994

10. E. Goodwin, "A review of operational laser communication systems," Proceedings of the IEEE, vol. 58, no. 10, pp. 1746–1752, Oct. 1970

11. D. L. Begley, "Free-space laser communications: a historical perspective," Annual Meeting of the IEEE, Lasers and Electro-Optics Society (LEOS), vol. 2, pp. 391–392, Nov. 2002, Glasgow, Scotland

12. H. Hemmati, Deep Space Optical Communications, Wiley-Interscience, 2006

13. F. Hanson and S. Radic, "High bandwidth underwater optical communication", Applied Optics, ISSN 0003-6935 vol. 47, no. 2, pp. 277–283, Jan. 2008.

14. Daukantas, Patricia (Березень 2014). Optical Wireless Communications: The New Hot Spot (pdf). Optics and Photonics News. с. 34—41.

15. Ghassemlooy Z., Popoola, W., Rajbhandari, S. (2012). Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB (1st ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, Inc. ISBN 9781439851883.

16. Klehr A. High-power monolithic two-mode DFB laser diodes for the generation of THz radiation / A. Klehr, J. Fricke, A. Knauer et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2008. Vol. 14. N 2. P. 289–294.

17. Yao J. A tutorial on microwave photonics / J. Yao // IEEE Photonics Society Newsletter. April 2012. P. 4–12.

18. Seeds A. J. Terahertz photonics for wireless communications / A. J. Seeds, H. Shams, M. J. Fice, C. C. Renaud // Lightwave Technology J. 2015. Vol. 33. N 3. P. 579–587.

19. Capmany J. A tutorial on microwave photonic filters / J. Capmany, B. Ortega D. Pastor // Lightwave TechnologyJ. 2006. Vol. 24. N 1. P. 201–229.

20. Capmany J. Microwave photonics: current challenges towards widespread application / J. Capmany, G. Li, C. Lim, J. Yao // Optics Express. 2013. Vol. 21. N 19. P. 22862–22867.

21. Коваль В. М. Оптоелектронні інформаційні системи (конспект лекцій) : навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та

наносистемна техніка», освітньої програми «Мікро- та наноелектроніка». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 165 с.

22. Козярський І. П. Фотоелектроніка та оптоелектронні прилади : навчальний посібник. Чернівці : Чернівецький національний університет, 2019. 136 с.

23. Однодворець Л. В., Пазуха І. М., Лукавенко І. М. Оптоелектронні і лазерні системи в електроніці та медицині : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2022. 127 с.

24. Кучеренко О. К. Волоконна та інтегральна оптика : навч. посіб. для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані системи та технології» спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи і технології» та спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» спеціалізації «Фотоніка та оптоінформатика». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 216 с.

25. Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich. Fundamentals of Photonics. Chapter 8. Fiber optics. John Wiley & Sons, Inc., 1991. P. 272–309.

26. Карпуков Л. М., Щекотихін О. В., Воскобойник В. О. Волоконно-оптичні лінії зв'язку : навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. 153 с.

27. Shamini Pillay, Deepak Kumar, Hairul Azhar Abdul B. Rashid Weakly Guiding Fibers and LP Modes in Circular and Elliptical Waveguides. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. 2013. № 5. P. 333–335.

28. Конспект лекцій з дисципліни «Оптичні телекомунікаційні системи» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності - 172 «Електронні комунікації та радіотехніка». /Укл.: Марченко С. В., Морозов В. М. Кам'янське : ДДТУ, 2024 р. 176 с.

29. X. He Vertical Cavity Surface Emitting Laser technology // A comprehensive review Proceedings of the 2nd International Conference on Functional Materials and Civil Engineering, 2024, P.193-198.

30. Матеріали сайту компанії ALPHALAS GmbH URL: https://www.alphalas.com (дата звернення 10.03.2026).

31. Матеріали сайту компанії Wavelength Electronics URL: https://www.teamwavelength.com (дата звернення 10.03.2026).

32. Матеріали сайту компанії Sony Group Corp URL: https:// www.sony-semicon.com (дата звернення 10.03.2026).

33. Матеріали сайту компанії Maxim Integrated Products URL: https:// www.maxim-ic.com (дата звернення 10.03.2026).

34. Матеріали сайту International Engineering Consortium URL: https:// www.iec.org (дата звернення 10.03.2026).

35. Матеріали сайту LTSpice. ANALOG DEVICES. URL: https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html (дата звернення 14.03.2026).

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

37. 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»

Бондар Єгор
магістрант 1 курсу, ІННІ ім. Ю.М, Потебні ЗНУ
Шевалдін Володимир
студент 4курсу, ІННІ ім. Ю.М, Потебні ЗНУ
Науковий керівник – к.ф.-м.н., доцент Світанько М.В

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОННОЇ ІНТЕГРАЛЬНОЇ СХЕМИ МОДУЛЯТОРА ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ

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

Використовувати світло для передавання сигналу в електронному пристрої почали у 1960-х роках XX ст [1].

Най простішим варіантом модуляції оптичного сигналу може бути приклад схеми передавача на транзисторі, яка зображена на рисунку 1[2].

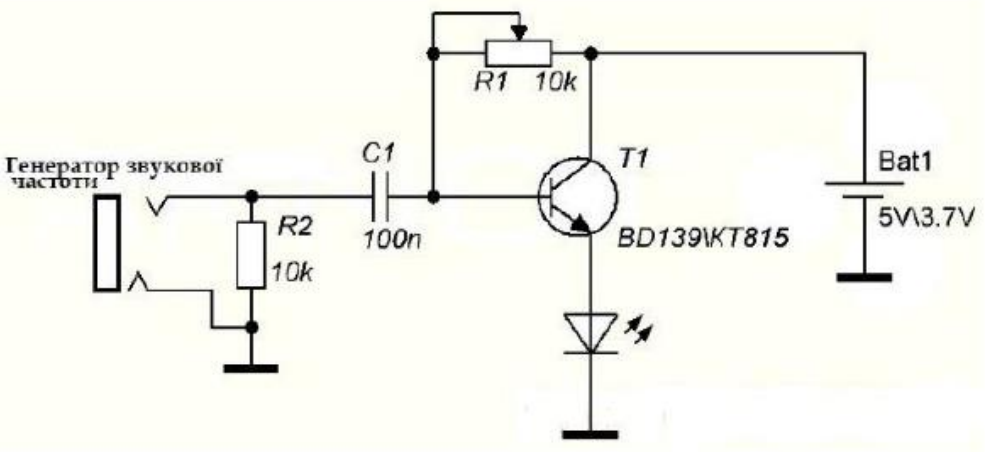


Рисунок 1 - Схема оптичного модулятора-передавача звуку

Для розробки ефективного оптичного каналу зв'язку використання подібних елементарних схем є недостатнім. Розроблювана схема, із урахуванням розвитку сучасних технологій оптоелектроніки, може бути реалізована за схемою, яка представлена на рисунку 2.

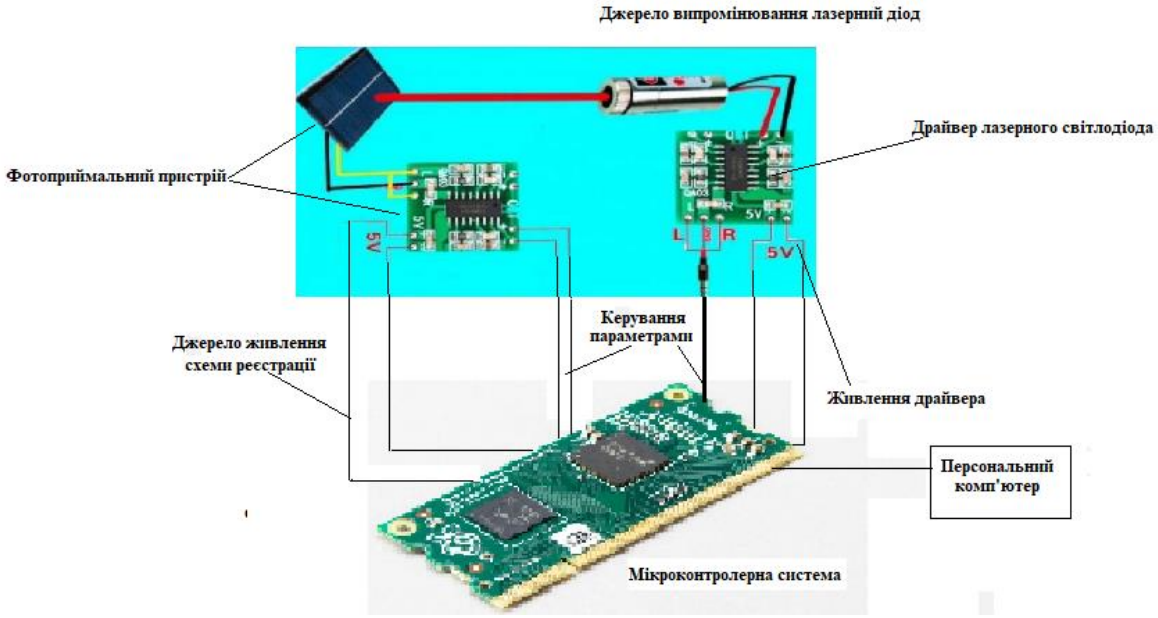


Рисунок 2 – Фотонна схема модулятора оптичного інформаційного сигналу

Враховуючи те, що розроблювана схема буде частиною квантово-інформаційного комплекса із величезним масивом даних, використання мікроконтролерного блоку реєстрації і обробки сигналів на малопотужних мікросхемах буде нераціональним. Тому, базою для мікроконтролерної системи пропонується використати мінікомп'ютер Raspberry Pi 1 (на прикладі моделі B), побудованій на (SoC) Broadcom BCM2835з процесором ARM1176JZF-S

Література:

1. 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», 2019. Кн. 2. 336 с.

2. Оптоелектронні інформаційні системи та волоконна й інтегральна оптика (практикуми) : навчальний посібник / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха, О. В. Пилипенко, А. О. Степаненко ; за заг. ред. Л. В. Однодворець. – Суми : Сумський державний університет, 2025. – 212 с.

3. B. J. Catanzaro, Multiprocessor system architectures. Englewood Cliffs, N.J : PTR Prentice Hall, 1994.

4. 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).

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