

Вінницький національний технічний університет

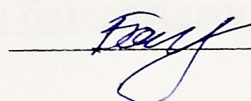
Факультет інформаційних електронних систем

Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

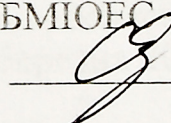
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

«Інформаційна система безпроводного інфрачервоного лазерного зв'язку»

Виконав: студент 4 курсу, групи КОІС-216
спеціальності 152 – Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка, ОП
«Комп'ютеризовані оптико-інформаційні
системи»

 Бондар В.В.

Керівник: к.т.н., доц., доцент кафедри
БМІОЕС

 Тужанський С.Є.

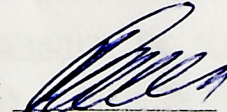
« 10 » червня 2025 р.

Рецензент: к.т.н., ст.викл. каф. ІРТС

 Притула М.О.
(прізвище та ініціали)

« 16 » червня 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри БМІОЕС  Л.Г. Коваль

« 17 » червня 2025 р.

Вінницький національний технічний університет

Факультет інформаційних електронних систем

Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 15 - автоматизація та приладобудування

Спеціальність 152 - метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

Освітньо-професійна програма – комп'ютеризовані оптико-інформаційні системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри БМІОЕС



Л.Г. Коваль

«21» березня 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Бондар Володимир Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інформаційна система безпроводного інфрачервоного лазерного зв'язку

Керівник роботи Тужанський Станіслав Євгенович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом ВНТУ від "20" березня 2025 року № 97

2. Термін подання студентом роботи 30 травня 2025 р.

3. Технічні вимоги до системи – оптична атомосферна лінія передачі інформації (FSO), дальність зв'язку – 1000 м; швидкість передачі даних – 100 Мбіт/с; робоча довжина хвилі лазера – 1300 нм, потужність лазера – 100мВт; фотоприймач - pin фотодіод, блок керування – мікропроцесорний, блок живлення – 220 В, 50 Гц.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; аналіз та класифікація методів та засобів оптичного атмосферного зв'язку, розробка узагальненої структурної, оптичних і електричних схем системи, моделювання роботи трансівера для FSO-системи з використанням Arduino, аналіз роботи системи, висновки; список використаних джерел; додатки.

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

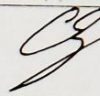
5.1 Схема структурна FSO системи ІЧ лазерного зв'язку

5.2 Схема електрична лазерного передавача FSO системи

5.3 Схема фотоприймального пристрою

5.4 Електрична схема модулятора сигналів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Спеціальна частина	Тужанський С.Є. к.т.н., доцент кафедри БМІОЕС		

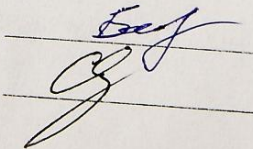
7. Дата видачі завдання «11» березня 2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітка
	початок	закінчення	
Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	11.03.2025	19.03.2025	Виконано
Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	20.03.2025	09.04.2025	Виконано
Пошук методів і засобів вирішення поставленої задачі	10.04.2025	01.05.2025	Виконано
Розробка методу і структури системи	02.05.2025	17.05.2025	Виконано
Розробка схем і програмних модулів керування	18.05.2025	24.05.2025	Виконано
Експериментальні або модельні дослідження системи	24.05.2025	31.05.2025	Виконано
Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	01.06.2025	07.06.2025	Виконано
Нормоконтроль	05.06.2025	09.06.2025	Виконано
Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	11.06.2025	16.06.2025	Виконано
Захист БКР ЕК	19.06.2025	20.06.2025	

Студент

Керівник роботи



В.В. Бондар

С.Є. Тужанський

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 61 сторінок формату А4, на яких є 6 таблиць, список використаних джерел містить 25 найменувань.

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню методів і систем відкритої оптичної передачі інформації в інфрачервоному діапазоні. Проведено аналітичний огляд і класифікацію таких систем. Запропоновано схему лінії лазерного відкритого зв'язку із можливістю адаптації до зміни атмосферних умов із розширеними функціональними можливостями.

На основі аналізу методів і схем відкритої оптичної передачі інформації обґрунтовано вибір методу та ключових компонентів системи: лазерний трансмітер, блок керування, модулятор, фотоприймач, оптичний модуль розширення пучка. Здійснено комп'ютерне моделювання та програмування роботи трансівера на лазерному модулі K-008 в Arduino.

Також в роботі підсумовано результати модельних експериментів та режимів роботи пристрою.

Ключові слова: лазер, атмосферний зв'язок, FSO, інфрачервоний канал, Arduino.

ABSTRACT

The bachelor's qualification work consists of 61 pages of A4 format, on which there are 6 tables, the list of used sources contains 25 names.

The bachelor's qualification work is devoted to the study of methods and systems of open optical information transmission in the infrared range. An analytical review and classification of such systems is carried out. A scheme of a laser open communication line with the ability to adapt to changing atmospheric conditions with extended functionality is proposed.

Based on the analysis of methods and schemes of open optical information transmission, the choice of the method and key components of the system is justified: laser transmitter, control unit, modulator, photodetector, optical beam expansion module. Computer modeling and programming of the transceiver operation on the K-008 laser module in Arduino is carried out.

The work also summarizes the results of model experiments and device operating modes.

Keywords: laser, atmospheric communication, FSO, infrared channel, Arduino.

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ	8
1.1.1 Принцип та короткий опис імпульсного лазерного далекоміра	8
1.1.2 Метод підвищення точності імпульсних лазерних далекомірів	10
1.2 Принцип та короткий опис фазового лазерного далекоміра.....	12
1.3 Прямий вимірювальний частотний метод	15
1.3 Непрямий вимірювальний частотний метод	16
1.4 Порівняння методів лазерного вимірювання відстані	16
1.5 Аналіз характеристик та елементної бази лазерних далекомірів	18
1.5.1 Елементна база лазерного далекоміра: лазерний діод.....	22
1.5.2 Елементна база лазерного далекоміра: фотоприймач	24
1.6 Висновки до розділу 1.....	26
2. ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ДАЛЕКОМІРА	27
2.1 Вибір лазерного діода	27
2.2 Будова LD905A10C17	28
2.2.1 Вибір драйвера для лазера.....	29
2.2.2 Схема керування лазером	31
2.3 Вибір мікроконтролера	33
2.4 Вибір фотоприймача	34
2.5 Вибір оптики: об'єтив для фотоприймача	41
2.6 Вибір дисплея	42
2.7 Висновки до розділу 2.....	44
3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЕКОМІРА.....	45
3.1 Узагальнена схема.....	45
3.2 Алгоритм роботи далекоміра	46
3.3 Робота системи	48
3.5 Висновки до розділу 3.....	51
ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54
Додаток Б.1.....	58

Додаток Б.1.....	59
Додаток Б.2.....	60
Додаток Б.3.....	61
Додаток Б.4.....	62

ВСТУП

Актуальність дослідження: Сучасне суспільство дедалі більше покладається на бездротові технології обміну даними, які забезпечують високу мобільність, ефективність і незалежність від провідних мереж. Паралельно з широким використанням радіочастотного спектру зростає інтерес до альтернативних методів передавання інформації, одним із яких є інфрачервоний (ІЧ) лазерний зв'язок. Цей тип комунікації відзначається вузькою спрямованістю, високою швидкістю передавання сигналу та стійкістю до радіозавад, що робить його придатним для спеціалізованих технічних рішень [1], [2].

FSO (Free Space Optics) – відкритий атмосферний тип передачі інформації, який почав розвиватися в результаті об'єднання лазерних і телекомунікаційних технологій. Використання інфрачервоного оптичного діапазону для передачі даних відкрило широкі можливості для проектувальників систем зв'язку, що потребують максимальної оптимізації процесів передачі та пошуку альтернативних каналів зв'язку [3].

ІЧ-зв'язок активно використовується у приладах дистанційного керування, в охоронних системах, автоматизованих виробничих лініях, а також у сферах, де застосування радіохвиль є небажаним.

Таким чином, розробка інформаційних FSO систем атмосферного ІЧ зв'язку є актуальним та перспективним напрямком досліджень, який має важливе значення для підвищення захищеності та мобільності систем передачі у різних умовах експлуатації, а також для подальшого розвитку лазерних інформаційних технологій.

Мета дослідження: Метою роботи є розширення функціональних можливостей відкритих оптичних лазерних систем передачі інформації шляхом автоматизації процесом управління параметрами лазерного випромінювача, оптичної системи і блоку фотоприймача.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання:**

провести аналіз сучасного стану та перспектив розвитку лазерних атмосферних систем безпроводного інфрачервоного зв'язку, повести класифікацію таких систем.

озробити та описати структурну схему адаптивної системи відкритого лазерного зв'язку.

бґрунтувати вибір елементної бази та розробити функціональні схеми основних блоків і компонентів системи.

озробити алгоритми управління лазерним та фотоприймальним модулем та оцінити характеристики їх роботи.

дійснити моделювання роботи функціональних блоків системи та розробити програмне забезпечення для мікропроцесорного управління лазерним модулем на платформі Arduino.

Об'єктом дослідження є процеси оптичної передачі інформації у відкритому просторі.

Предметом дослідження є інформаційна система відкритого лазерного атмосферного зв'язку, зокрема структура, компоненти, функціональні можливості та алгоритми управління.

1. АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

В зв'язку з постійним розвитком інформаційних технологій і розширенням їх сфери вживання збільшуються вимоги до пропускної спроможності каналів обчислювальних мереж і їх надійності. На даний момент домінуючим є використання оптоволоконних і радіоканалів. Проте в останні декілька років швидко розвивається технологія атмосферних оптичних ліній зв'язку. Їх перспективність пояснюється багатьма чинниками, а саме: легкістю монтажу і експлуатації, високими (до декількох Гбіт/с) швидкостями передачі, більш вигідними в порівнянні з традиційними засобами економічними показниками [3,4,6,7].

1.1 Порівняння різних способів побудови каналу зв'язку

Однією з основних проблем при побудові сучасних цифрових мереж передачі даних є проблема вибору устаткування [5]. Розглянемо наступні можливі способи фізичної організації каналів зв'язку:

1. Два бездротових канали.
2. Радіоканал
3. Оптичний канал.
4. Два дротових канали (на основі волоконно-оптичного кабелю з установкою відповідної апаратури сполучення).

При довжині каналів порядку декількох кілометрів (або десятків кілометрів) найбільш часто використовуються волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ). Вони забезпечують високі показники якості (частота появи помилкових бітів (BER – bit error rate) менше 10^{-10}) і швидкості передачі, однак на сьогоднішній день залишаються дорогими системами [6,7]. Волоконно-оптичний кабель дозволяє одержати високу пропускну спроможність мережі і зробити її максимально "прозорою" для різних протоколів [1-3].

В наш час для бездротового обміну інформацією широко застосовуються радіорелейні лінії і радіомодеми. Максимальна дальність дії

бездротових радіоканалів — 80 км (без використання ретрансляторів). Радіорелейні лінії працюють в діапазоні частот до 60 ГГц і, як правило, забезпечують швидкість передачі до 140 Мбіт/с і вище. Проте при використанні радіомодемів і радіорелейних ліній виникає проблема, пов'язана із спотворенням або навіть втратою сигналу через насиченість радіоефіру [6,7].

Зараз інтенсивно розвивається технологія бездротового зв'язку АОЛЗ (атмосферні оптичні лінії зв'язку, або FSO – Free Space Optics). Вона має безперечну перевагу перед радіозв'язком при організації бездротових мостів ("точка-точка") на відстані близько декількох кілометрів. На користь технології АОЛЗ свідчать наступні характеристики [1]:

1. Швидкість передачі даних може досягати декількох Гбіт/с;
2. Частота появи помилкових бітів (BER) від 10^{-10} до 10^{-9} ;
3. В жодній країні не потрібна ліцензія на використання діапазону частот;
4. Висока захищеність від перешкод радіодіапазону (завади можуть впливати тільки безпосередньо на кінцеве устаткування);
5. Невеликий (близько кількох годин) час розгортання, що дозволяє компаніям проводити швидке захоплення сегментів мережі. Причому системи АОЛЗ можуть використовуватися лише на початковому етапі монтування мережі і після створення постійних з'єднань бути перенесеними в інший сегмент.

В таблиці 1.1 приведені тривалість і розрахункова вартість спорудження магістральних каналів з використанням різних технологій [6,7].

Проте бувають ситуації, коли навіть така вартість АОЛЗ може виявитися надто високою. Зокрема, АОЛЗ технології практично не використовуються в широкій і інтенсивній області побудови міських районних обчислювальних мереж. З цієї ж причини АОЛЗ практично не використовуються, як устаткування "останньої милі" [8]. Іншим стримуючим чинником є ступінь недовіри до АОЛЗ, що пояснюється новизною технології і залежності від погодних умов. Для його подолання необхідно використовувати різні методи

підвищення надійності АОЛЗ, зокрема використовувати алгоритми перешкодозахисної передачі даних та криптографічний захист [10].

1.2 Вплив атмосфери

Для успішного застосування АОЛЗ і передачі інформації лазерним променем необхідно враховувати залежність пропускання оптичного випромінювання від стану повітряного середовища. Тому були проведені комплексні дослідження поширення лазерного випромінювання в атмосфері [10-11].

Поширення лазерного випромінювання в атмосфері супроводжується цілим рядом явищ лінійної і нелінійної взаємодії світла із середовищем. При цьому жодне з цих явищ не виявляється окремо. По чисто якісних ознаках зазначені явища можна розділити на три основні групи: поглинання і розсіювання молекулами газів повітря, ослаблення на аерозолях (пил, дощ, сніг, туман) і флуктуації випромінювання на турбулентностях атмосфери.

Поглинання світлового потоку видимого й інфрачервоного діапазонів визначається, насамперед, молекулярним поглинанням, вкрай нерівномірним по частоті. Воно максимально на резонансних частотах молекул повітря, води, вуглекислого газу, озону й інших компонентів атмосфери.

На рисунку 1.1 приведений спектр поглинання сонячного випромінювання з малою спектральною роздільною здатністю.

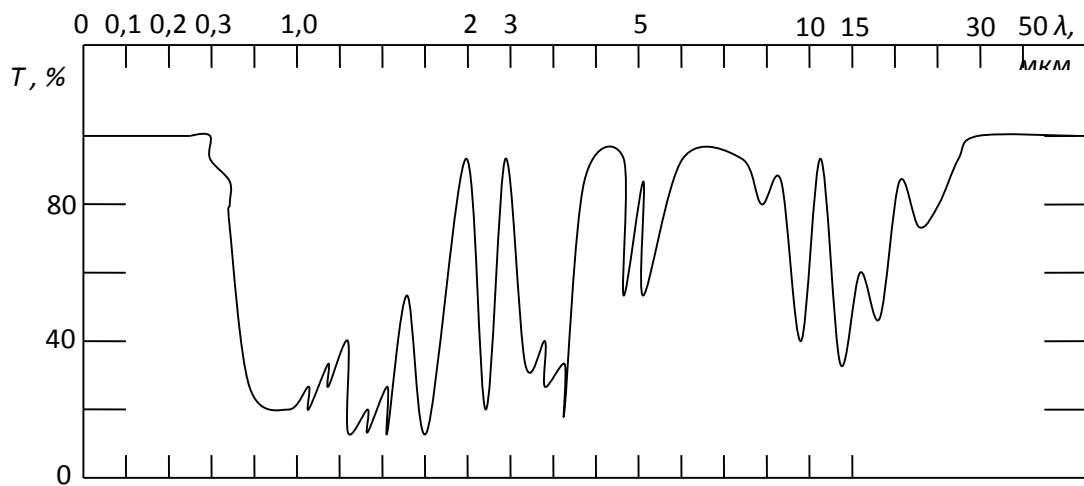


Рисунок 1.1 – Залежність поглинання T в атмосфері від довжини хвилі сонячного випромінювання

Кожна з зображених тут смужок, як правило, є результатом накладення і перекриття декількох смуг як одного й того самого газу, так і різних газів. В різних атмосферних умовах і різних регіонах подібні графіки будуть розрізнятися через різний вміст водяної пари і інших компонентів повітря. Є ділянки спектра, де поглинання незначне. Вони називаються вікнами прозорості. Однак при більшій роздільній здатності й у вікнах прозорості існують цілі сукупності різних смуг поглинання.

Якщо довжина хвилі лазера відома, то поглинання його випромінювання може бути заздалегідь визначене для будь-яких реальних умов в атмосфері. Якщо лазерне випромінювання попадає в центр сильної лінії спектра, то воно поглинається атмосферою на 100% навіть на невеликій відстані. Тому для АОЛЗ варто брати лазери з випромінюванням, що знаходиться на ділянках спектра атмосфери, зайнятих широкими вікнами прозорості або в проміжках між слабкими лініями поглинання, у мікровікнах прозорості.

При цьому частота випромінювання повинна бути стабілізована з досить високою точністю, особливо якщо вона знаходиться на близькій відстані від лінії поглинання газів.

Крім молекулярного поглинання поширенню променів заважає молекулярне розсіювання променистої енергії мікрозгустками молекул повітря, що мають різну щільність і різні показники заломлення. Ці неоднорідності в газовому середовищі досить нестабільні і залежать від місцевих температурних умов, часу року і доби, а також від змісту домішок у кожній конкретній мікрзоні атмосфери. Молекулярне розсіювання достатнє добре вивчено. Складено великі таблиці коефіцієнтів розсіювання у видимій і інфрачервоній областях спектра, що забезпечують досить точний кількісний розрахунок втрат енергії випромінювання на заданій відстані [9]. Цей тип розсіювання не робить істотної шкоди АОЛЗ на відміну від аерозольного розсіювання.

Атмосфера являє собою механічну суміш з газів, пари, краплин рідини і твердих часток. У ній завжди в перемінній кількості присутні пил, дим, кристалики льоду. Тому атмосфера є аерозолем, склад якого безупинно змінюється через перемішування. Говорячи про аерозольне розсіювання загалом, мають на увазі аерозольне ослаблення, обумовлене не тільки розсіюванням, але і поглинанням випромінювання частками аерозолю.

Усі типи атмосферних аерозолів можна об'єднати в наступні основні класи: хмари, тумани, димки, морозь і опади - дощ або сніг. У хмарах і туманах найбільш ймовірне значення радіуса часток складає 5-6 мкм, а в димках на 1-2 порядок менше. Тому ослаблення мікронного випромінювання в димках нижче. Результати вимірів прозорості димок, туманів і опадів у різних кліматичних районах викладені в [11-12]. При цьому теоретично й експериментально показане, що ослаблення сигналу при дощі і снігопаді менше, ніж при тумані (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Ослаблення випромінювання в діапазоні 0,85 мкм у залежності від погодних умов.

Погодні умови	Загасання, дБ/км
Ясна погода	0 - 3
Слабкий дощ	3 - 6
Сильний дощ	6 - 17
Сніг	6 - 26
Легкий туман	20 - 30
Густий туман	50 - 100

З таблиці 1.1 і рисунка 1.1 видно, що головними обмежниками дальності АОЛЗ є густий сніг і густий туман, для яких аерозольне ослаблення максимальне. На поширення лазерного променя сильний вплив робить також турбулентність атмосфери, тобто випадкові просторово-тимчасові зміни показника переломлення, викликані переміщенням повітря, флуктуаціями його температури і щільності. Тому світлові хвилі, що поширюються в атмосфері, випробують не тільки поглинання, але і флуктуації переданої потужності.

Турбулентність атмосфери приводить до перекручувань хвильового фронту і, отже, до коливань і розширення лазерного пучка і перерозподілові енергії в його поперечному перерізі. У площині прийомної антени це виявляється в хаотичному чергуванні темних і яскравих плям з частотою від часток герца до декількох кілогерців. При цьому іноді виникають завмирання сигналу (термін запозичений з радіозв'язку) і зв'язок стає нестійким. Завмирання найбільш сильне виявляється в ясну сонячну погоду, особливо в літні жаркі місяці, у години сходу і заходу сонця, при сильному вітрі.

Найпростішим способом боротьби з завмираннями є збільшення розміру прийомної оптичної антени або використання декількох прийомних антен (до 8). При цьому відбувається усереднення флуктуацій випромінювання, прийнятого окремими елементами, і вирівнювання сигналу. Інший спосіб полягає в некогерентному додаванні в одному каналі випромінювання декількох лазерів.

При практичному використанні лазерів у системах атмосферного зв'язку необхідно враховувати сукупний вплив взаємодії випромінювання з атмосферою - одночасно поглинаючим, розсіюючим і випадково неоднорідним середовищем. Цей вплив може змінюватися в надзвичайно широкому діапазоні. Тому для забезпечення працездатності АОЛЗ на заданій дистанції з визначеним рівнем надійності (або доступності каналу) необхідно мати достатній динамічний запас енергетичного потенціалу.

1.3 Аналіз елементної бази інфрачервоного відкритого оптичного безпроводного зв'язку

Приймач-передавач АОЛЗ виготовляється в захищеному і обігріваному корпусі. При розробці приймачів-передавачів для АОЛЗ використовуються спеціальні заходи для забезпечення їх стійкої роботи у всьому діапазоні погодних умов. Наприклад, для захисту від прямого сонячного проміння об'єктив приймача може бути закритий блендою, а для захисту від гідрометеоритів (снігу і дощу) і птахів діаметр променя роблять великим (близько 2 м в області приймача). Слід зазначити, що туман набагато більше впливає на якість передачі, ніж сніг і дощ. Це обумовлено тим, що на крапельках туману, розмір яких рівний довжинам хвиль оптичного випромінювання, промінь розсіюється сильніше, ніж на крапельках дощу або частинках снігу. Подібної ситуації можна уникнути, вибравши устаткування, що забезпечує запас по дальності зв'язку (тобто чутливості приймача) [14].

Побудова всіх інфрачервоних систем передачі практично однакова: вони складаються з інтерфейсного модуля, модулятора випромінювача, оптичних систем передавача і приймача, демодулятора приймача і інтерфейсного блоку приймача [15]. Залежно від типу оптичних випромінювачів, що використовуються, розрізняють лазерні і напівпровідникові інфрачервоні діодні системи, що мають різні швидкості і дальність передачі. Перші

забезпечують дальність передачі до 15 км з швидкостями до 155 Мбіт/с (комерційні системи) або до 10 Гбіт/с (дослідні системи). Слід зазначити, що з посиленням вимог до якості каналу дальність зв'язку знижується. Другі забезпечують істотно меншу дальність передачі, хоча у міру розвитку технології дальність і швидкість зв'язку зростають [16].

Головна перевага напівпровідникових діодів полягає у високому часі напрацювання на відмову. Крім того, такі канали менш чутливі до резонансного поглинання в атмосфері. Форма перерізу променя від напівпровідникових діодів практично кругла [17].

Недоліки напівпровідникових діодів і, відповідно переваги лазерів, полягають в тому, що через широку смугу випромінювання існують теоретичні складнощі в передачі високошвидкісного сигналу. Передавач повинен передавати якомога більш вузькосмуговий сигнал з якнайменшою кількістю мод. Лазери діоди якраз і володіють такими властивостями, але чим вужча смуга сигналу, тим більше потенційна вірогідність того, що сигнал потрапить в атмосфері в резонансну смугу поглинання якогось газу і якість сигналу знизиться [18,19,20].

Форма перерізу променя лазера- еліптична. Для усунення цього недоліку застосовують різні методи: від використання призматичних лінз до обмеження апертури оптичної системи при втраті частини потужності [20].

Можливе також створення резервного радіоканалу. В цьому випадку істотно підвищується дальність передачі, оскільки не існує погодних умов, перешкоджаючих роботі одночасно обох каналів, тобто можливе використання АОЛЗ і радіо пристроїв практично на граничній дальності, не створюючи запас потужності на випадок поганих метеоумов [20].

Проаналізувавши ринок комерційних систем, які пропонують основні на сьогодні виробники систем PAV Data Systems (Великобританія), FSONA (США)), можна скласти порівняльну таблицю для таких систем, щоб оцінити їх за основними параметрами. В таблиці 1.3 представлені характеристики АОЛЗ від основних виробників таких систем.

Таблиця 1.3 – Характеристики АОЛЗ від основних виробників

Модель, виробник	Швидкість передачі, Мбіт/с	Дистанція м.	Потужність випромінювача, мВт	Довжина хвилі, нм	Тип випромінювача	Тип приймача
PAVExpress 100, PAV Data Systems	100 Full duplex	0 - 200	25	910	н/п ІЧ лазер	р-і-п фотодіод
PAVLight E1-2000, PAV Data Systems	2 Full duplex	0-2000	100	910	н/п ІЧ лазер	р-і-п фотодіод
PAVLight E1-4000, PAV Data Systems	2 Full duplex	0-4000	100 (сумарна 300 мВт)	910	н/п ІЧ лазер	р-і-п фотодіод
PAVLight ET-4000, PAV Data Systems	10 Full duplex	450-4000	100 (сумарна 300 мВт)	910	н/п ІЧ лазер	р-і-п фотодіод
PL-1G/3TX, PAV Data Systems	1 Гб/с Full duplex	200-1500	75 (сумарна)	810	н/п ІЧ лазер	лавинний фотодіод (APD)
PL-622/3TX, PAV Data Systems	1.5 до 622 Full duplex	200-1500	75 (сумарна)	830	н/п ІЧ лазер	лавинний фотодіод (APD)
SONAbeam [™] 52E, FSONA	10-68 Full duplex	50-1800	100 (сумарна)	1550	н/п лазер	н/д

Як видно з таблиці виробники по різному намагаються збільшити дистанцію на якій можуть працювати системи АОЛЗ. Саме відстань на якій працюють такі системи є основним стримуючим фактором їх масового впровадження. Відстань в свою чергу залежить від погодних умов, а саме від

умов поширення в атмосфері лазерного променя. Саме для збільшення робочої відстані як бачимо сьогодні виробники використовують: різні довжини хвиль, щоб зменшити поглинання в атмосфері, використання кількох випромінювачів, щоб збільшити загальну вихідну потужність, використання кількох приймачів, щоб мати змогу детектувати якомога слабкіший сигнал, використання сонячних фільтрів, для запобігання фонових засвічувань, які також впливають на якість передачі сигналу.

Виходячи з вищезазначеного можна визначити основні переваги існуючих систем АОЛЗ [22]:

1. Захищеність каналу від несанкціонованого доступу.
2. Несанкціоноване знімання передаваної інформації можливе тільки тоді, коли приймач сигналу розміщується безпосередньо перед передавачем, що неминуче призводить до переривання зв'язку в основному каналі і реєстрації такої спроби. Оптичні системи можна використовувати при організації каналу для додатків, що вимагають високого рівня безпеки (у військових цілях, в банківській сфері і т.д.);
3. Значні інформаційні місткості каналів (до десятків Гбіт/с) забезпечують можливість стійкого криптографування;
4. Високий захист каналу від перешкод. На відміну від радіопристроїв і модемів для виділених ліній оптичні системи не сприйнятливі до перешкод і електромагнітного шуму; для організації каналу не потрібне отримання дозволів на частоту, що істотно здешевлює і прискорює створення мережі.

Поряд з перевагами можна зазначити також недоліки таких систем. Основними можна вважати [23]:

1. Малий час напрацювання на відмову (показник MTBF) випромінюючого елемента (лазера або світлодіода).
2. Сильна залежність відстані передачі сигналу від погодних умов.

Ці чинники обумовлювали готовність багатьох FSO-рішень для міських умов на рівні 99,7 %, що часто було недостатньо для роботи з деякими

критичними бізнес-додатками і абсолютно неприйнятним для використання FSO в провайдерських мережах. Адже подібна готовність обіцяє неробочий стан мережі до 27 годин в році. В FSO-системах також знайшли вживання схеми APC (Adaptive Power Control), які управляють потужністю випромінювання залежно від атмосферних умов (наприклад, в ясну погоду потужність випромінювання мінімальна). Такі схеми дозволяють продовжити термін життя лазерних пристроїв і підвищити їх надійність. Можна зробити висновок, що для покращення робочих характеристик сучасних систем АОЛЗ можна покращувати характеристики випромінювача (випромінювального елемента) та приймача сигналу. Саме ці елементи є одними з основних керованих параметрів систем АОЛЗ і покращення їх робочих характеристик зможе усунути недоліки пов'язані з пунктом 1 переліку недоліків. Використання новітніх джерел випромінювання в таких системах та новітніх чутливих фотоприймачів може суттєво покращити роботу та надійність таких систем та вивести їх на якісно новий рівень розвитку [23,24,25].

1.4 Класифікація систем атмосферного оптичного зв'язку

Аналізуючи сьогоdnішній ринок систем АОЛЗ можна скласти узагальнену характеристику таких систем на основі заявлених виробниками параметрів даних систем. На рисунку 1.2 наведено класифікацію таких систем, а в таблиці 1.4 наведено основні значення вказаних у характеристиці параметрів систем АОЛЗ.

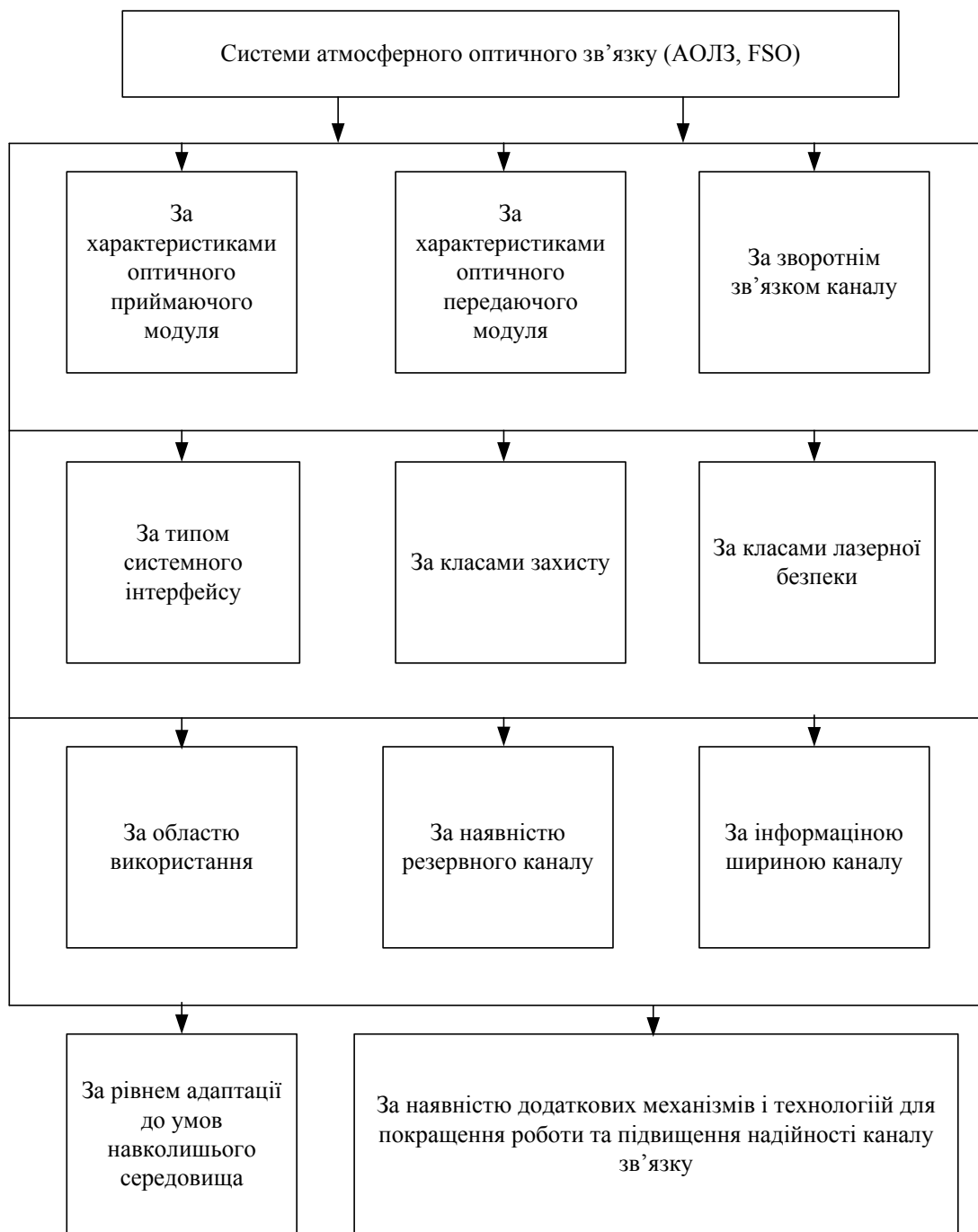


Рисунок 1.2 – Класифікація систем атмосферного оптичного зв'язку

Таблиця 1.4 – Значення основних параметрів систем атмосферного оптичного каналу зв'язку

Основні параметри FSO-систем	Значення параметра
Довжини хвиль (нм)	785; 750-850; 785-850; 850-890; 900-920;
Ширина каналу, (Мбіт/с)	2; 8; 10; 34; 100; 155; 100/200; 622; 1250; 2500
Тип випромінювача	н/п лазер (від 1 до 4 в одному передавачі)
Тип фотоприймача	Кремнієвий PIN -діод; германієвий PIN -діод; InGaAs PIN- діод; кремнієвий ЛФД; германієвий ЛФД; InGaAs ЛФД
Вихідна оптична потужність, (мВт)	20; 30; 50; 100; 150; 200; 250; 2*150; 2*250
Рекомендована дистанція, (м)	50-5000
Кількість помилок (BER)	$<10^{-9}$
Швидкість передачі даних, (Мбіт/с)	від 1.5 до 622 Мбіт/с
	1000 full duplex
Технологія дублюючого каналу	Wi-Fi; Wi-Max; радіо і т.п.
Основні компанії виробники	MRV Communication, Inc. (США)
	PAV Data Systems (Великобританія)
	FSONA(США)

1.5 Висновки до розділу 1

У розділі проведено аналіз інформаційних технологій передачі інформації з акцентом на безпроводні системи. Здійснено порівняльний аналіз систем атмосферного оптичного зв'язку провідних виробників, а також класифікацію таких систем за відповідними ознаками.

Проаналізувавши існуючі системи можна висунути сформулюємо вимоги до розроблюваної в роботі системи інфрачервоного відкритого оптичного каналу корпоративного зв'язку:

1. Дальність зв'язку 1 км.
3. Швидкість передачі даних 10 – 100 Мбіт/с.
4. Прозорість для мережевих протоколів канального рівня.
5. Висока надійність АОЛЗ і великий час (не менше 10 років) напрацювання на відмову.

Для забезпечення покращення роботи розроблюваної системи інфрачервоного відкритого оптичного каналу зв'язку пропонується підвищити надійність та час напрацювання на відмову за допомогою покращення характеристик пари елементів приймач-передавач, а саме використання в якості цих елементів новітніх випромінювачів (VCSEL-лазерів, NEVCSEL-лазерів, лазерів на основі квантоворозмірних гетероструктур) та чутливих фотоприймачів (нові APD та PIN фотоприймачі). Тобто покращивши елементну базу вже існуючих систем АОЛЗ ми отримаємо усунення деяких недоліків, що негативно впливають на якість роботи каналу, його довговічність, залежність апаратури від погодніх умов тощо.

2. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ТА РОЗРОБКА СХЕМ СИСТЕМИ

2.1 Обґрунтування технології випромінювача для інфрачервоного відкритого оптичного каналу

Напівпровідникові лазери можна розділити на два основні класи: лазери з торцевим випромінюванням (Edge emitting lasers (EEL)) і з вертикальним випромінюванням (Vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL)).

Серед лазерів видимого і інфрачервоного діапазонів напівпровідникові лазери займають особливе місце по ряду своїх характеристик. В напівпровідниках вдається одержати дуже великі коефіцієнти підсилення $\sim 10^2$ — 10^3 см^{-1} , тому розміри напівпровідникового лазера можуть бути дуже малими — порядку часток мм [29,30,31].

Лазери на напівпровідниках GaAs, CdS, InAs, InSb, ZnS і ін. дозволяють майже повністю перекрити видимий і ближній інфрачервоний діапазони. Напівпровідникові інжекційні лазери характеризуються дуже високим ККД перетворення електричної енергії в когерентне випромінювання (близьким до 100%) і можуть працювати в безперервному режимі. Особливо перспективні інжекційні лазери на гетеропереходах, які працюють в безперервному режимі при кімнатній температурі, створюючи потужність $\sim 5 \times 10^{-2}$ Вт при ККД до 25% [31].

В напівпровідникових лазерах із збудженням електронним пучком можна збуджувати великі об'єми напівпровідників, ніж у випадку інжекції через р — n-переходи. Пікова потужність при цьому доходить до 1 МВт при середній потужності ~ 1 Вт. ККД при електронному збудженні не може перевищувати 30% [24].

В порівнянні із звичайними напівпровідниковими лазерами, квантоворозмірні мають ряд істотних відмінностей [40]:

1. Квантові переходи в напівпровідникових лазерах обумовлені зонною структурою матеріалу.

2. Мають дуже малі розміри ($\sim 0,1$ мм в довжину), і ще меншу активну область (~ 1 мкм і менше), тому розходження променя значно більше, ніж у звичайного лазера.

3. Просторові і спектральні характеристики випромінювання напівпровідникового лазера сильно залежить від властивостей матеріалу, з якого зроблений перехід (структура забороненої зони і коефіцієнт заломлення).

4. Лазерне випромінювання виникає безпосередньо під дією струму, що протікає через прямозміщений діод. В результаті виходить надзвичайно ефективна система, оскільки модуляція випромінювання відбувається за рахунок модуляції струму.

5. Принциповою відмінністю новітніх лазерів є наявність вбудованого оптичного резонатора, що дозволяє одержати режим індукованого випромінювання, яке характеризується високим ступенем когерентності.

Розглянемо лазери з вертикальним об'ємним резонатором, (VCSEL лазер), Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL laser). Як правило вони працюють на довжині хвилі 850 нм [42].

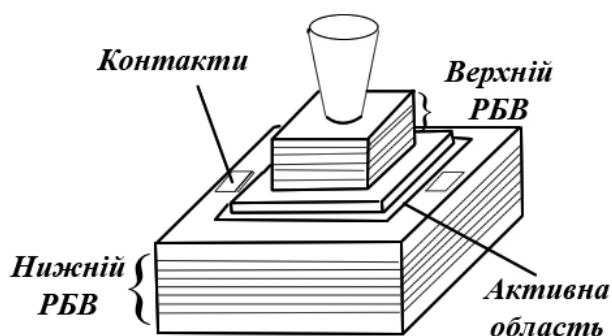


Рисунок 2.1 – Лазер з вертикальним об'ємним резонатором

В порівнянні з поперечними випромінювачами лазери VCSEL мають ряд переваг – вони набагато простіші у виготовленні, оскільки допускають масову

обробку безлічі елементів на одній підкладці, і споживають менше енергії. Окрім цього, вони допускають високошвидкісну модуляцію, завдяки чому дозволяють генерувати сигнали із швидкістю 1 Gbps і більше [40].

Доступні сьогодні VCSEL виготовляються з арсеніду галію (GaAs) і випромінюють світло в діапазоні від 750 до 1000 нм. Довжини хвиль цього діапазону дуже короткі, щоб передавати сигнали на великі відстані, тому VCSEL застосовуються в мультимодових кабелях (які останнім часом не дуже популярні) [41].

Нова більш досконала технологія лазерів з поверхневим випромінюванням NECSEL (New Extended Cavity Surface Emitting Laser) за рахунок більшої площі апертури і унікальної конструкції резонатора дозволила збільшити потужність випромінювання на два порядки, зберігаючи при цьому симетрію вихідного променя і вузьку спектральну характеристику.

Структура випромінювача NECSEL наступна. Лазер змонтований на кераміці з окислу берилія, що забезпечує відведення тепла від кристала. Він складається з р-n переходу і спеціального шару QWs, в якому відбувається випромінювальна рекомбінація електронів і дірок. Напівпровідник р-типу (р-DBR) є багатошаровим Брегівським дзеркалом з коефіцієнтом віддзеркалення, близьким до 100%. Для забезпечення виходу випромінювання напівпровідник п-типу (п-DBR) теж виконаний у вигляді Брегівського дзеркала, але напівпрозорого. За рахунок протікання великого струму початковий кристал з арсеніду галію (GaAs) нагрівається, і в ньому утворюється теплова лінза, яка збільшує густину випромінювання на виході.

Основні переваги VCSEL порівняно з EEL наступні [22]:

1. Більш низький пороговий струм за рахунок меншого об'єму активної області.
2. Високий ККД за рахунок вживання дзеркал з коефіцієнтом віддзеркалення близьким до 100 %.
3. Одномодовий режим роботи через меншу довжину резонатора.
4. Більш вузька ширина спектру випромінювання.

5. Кругова форма вихідного випромінювання не вимагає вживання коліматорів для фокусування випромінювання в світловод.

6. Більш проста технологія виготовлення щільно упакованих двовимірних матриць лазерів.

7. Можливість проведення тестування безпосередньо після виготовлення.

8. Відносний низький вплив температури на зміну довжини хвилі і величини порогового струму.

9. Значно вищий строк служби.

Таблиця 2.1 – Характеристики лазерів на основі квантоворозмірних структур

Модел ь	Довжина хвилі випромін ювання, нм.	Потужніст ь випромін ювання, мВт	Робо чий стру м нака чки, мА	Рабо ча напр уга, В	Порог овий струм, мА	Розходж ення, град.	Ширина лінії випромін ювання (FWHM), нм	Шир ина смуг и, мкм
Лазери ІЧ діапазону MOCVD AlGaInP квантоворозмірні структури								
IDL1 00S- 810	800...820	100	160	2,2	3	10 x 35	1,5	30
IDL5 0S- 830	820...840	50	120	2,2	25	10 x 30	1,5	3
IDL1 00S- 830	820...840	100	160	2,2	35	10 x 35	1,5	3
IDL5 0S- 850	840...870	50	150	2,2	40	10 x 35	1,5	3
IDL1 00S- 850	840...880	100	160	2,2	35	10 x 35	1,5	3

Враховуючи все вищесказане пропонується в якості покращення елементної бази системи АОЛЗ, а саме випромінювача, використати лазер на основі VCSEL технології або лазер на основі InAlGaAs квантоворозмірних гетероструктур.

Серед запропонованих на ринку лазерів на основі VCSEL технології було обрано лазер компанії Honeywell SV5637-001 – високоефективний 850 нм лазер. Технічні характеристики випромінювача:

1. Висока швидкість: >1 Гбіт/с.
2. Вихідна потужність 125 мВт.
3. Підходить для систем з батарейним живленням (7-15 мА).
4. Піковий струм (не більше 1 мкс): 20 мА.
5. Довжина хвилі: 830-870 нм.
6. Розходження променя: 2 градуси.
7. Період безвідмовної роботи 10^7 год.

Серед запропонованих на ринку лазерів на основі InAlGaAs квантоворозмірних гетероструктур можна звернути увагу на модель АТС-С4000-500 компанії Honeywell. Характеристики такого випромінювача наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.2 – Характеристики випромінювача АТС-С4000-500 на основі InAlGaAs квантоворозмірних гетероструктур

Параметр	Значення		
	мінімальне	нормальне	максимальне
Вихідна потужність, Вт	н/д	4	н/д
Ширина спектру (FWHM), нм	804	807	810
Довжина хвилі випромінювання, нм	н/д	3	н/д
Робочий струм, А	н/д	4,5	5
Робоча напруга, В	н/д	1,9	2,1
Розходження променя, град	н/д	6*35	10*40
Температурний коефіцієнт довжини хвилі випромінювання, нм/К	н/д	0,2	н/д
Період безвідмовної роботи, год	н/д	10^6 - 10^7	н/д

Як бачимо обидва випромінювачі мають, як переваги так і недоліки при їх порівнянні проте їх характеристики кращі ніж у напівпровідникових лазерів та світлодіодів, що сьогодні використовуються у системах АОЛЗ, зокрема по параметрам кута розходження випромінювання, температурного коефіцієнта довжини хвилі випромінювання, часу безвідмовної роботи, складності та ціни.

2.2 Вибір приймачів для інфрачервоного відкритого оптичного каналу

Найбільш перспективними для ІЧ діапазону довжин хвиль сьогодні є два види матеріалів, а саме на Використанні кремнію або арсеніду галію і миш'яку. Іншим матеріалом, що використовується в спектральному діапазоні систем АОЛЗ, є германій. Проте цей матеріал використовується рідше через високі значення темнового струму. Всі вказані матеріали чутливі в широкому діапазоні довжин хвиль і, на відміну від лазерів, не можуть налаштовуватися на конкретну довжину хвилі.[2].

Кремній найпоширеніший матеріал для приймачів у видимій і ближній ІЧ-області спектру.

Технологія роботи з кремнієм найбільш широко відома і даний матеріал може детектувати дуже малі інтенсивності випромінювання. Володіючи широкою смугою сприйнятливості до світла, кремній має залежність чутливості від довжини хвилі максимум якої знаходиться близько 850 нм. Це робить кремнієві приймачі ідеальними в поєднанні з короткохвильовими VCSEL-випромінювачами, що працюють на 850 нм. Проте чутливість кремнію дуже сильно зменшується для довжин хвиль понад 1 мкм. В результаті на довжина хвилі 1100 нм є межею застосовності кремнієвих приймачів. Кремнієві приймачі можуть працювати на високих частотах.

Широкодоступні менш швидкісні (1 Гбіт/с) кремнієві PIN-діоди і ЛФД. Також широко поширені кремнієві PIN-діоди з вбудованим трансімпедансним

підсилювачем. В таких детекторах чутливість є функцією смуги модуляції сигналу і обернено пропорційна їй. Типова чутливість кремнієвого PIN-діода складає -34 Дбм на 155 Мбіт/с. Кремнієві ЛФД значно чутливіші завдяки внутрішньому лавиноподібному процесу посилення і є дуже перспективними для використання в системах АОЛЗ. Значення чутливості для високочастотних використань складають -55 Дбм на декількох Мбіт/с, -52 Дбм на 155 Мбіт/с і -46 Дбм на 622 Мбіт/с. Кремнієві приймачі можуть бути великого розміру (тобто 0.2 мм x 0.2 мм) і можуть працювати на високих частотах. Ця властивість робить втрати мінімальними якщо світло фокусується на детекторі за допомогою лінз великого діаметра або параболічного відбивача [2,3].

В довгохвильовій області як матеріал для приймачів випромінювання як правило використовується з'єднання InGaAs . Як і кремній, InGaAs володіє широкою смугою і його спектральний відгук (або квантова ефективність) залежить від довжини хвилі випромінювання. Останні 10 років постійно йшла робота над поліпшенням таких характеристик InGaAs детекторів як чутливість і частотні параметри для їх використання у волоконно-оптичних пристроях на довжині хвилі 1550 нм. Практично у всіх довгохвильових волоконно-оптичних системах як матеріал для приймача використовується InGaAs . Виходячи з міркувань економіки InGaAs приймачі оптимізовані для роботи на обох довжинах хвиль – 1310 і 1550 нм [3-5].

Через сильне зниження чутливості в короткохвильовій області даний матеріал не застосовується для довжини хвилі 850 нм.

Основною перевагою InGaAs – приймачів є їх широка смуга в поєднанні з високим спектральним відгуком на 1550 нм. Більшість приймачів на InGaAs виготовляється на основі PIN або ЛФД технології. Як і у випадку з кремнієм InGaAs ЛФД-приймачі значно більш чутливі завдяки внутрішньому посиленню за рахунок лавинного процесу. Значення чутливості для високочастотних вживань складають -46 Дбм на 155 Мбіт/с і -36 Дбм на 1,25 Гбіт/с тоді як InGaAs приймачі працюють на великих швидкостях і мають менші розміри ніж їх кремнієві аналоги [1].

В таблиці 2.3 представлені перспективні матеріали для детекторів для використання в АОЛЗ їх основні фізичні властивості [5].

Таблиця 2.3 – Основні фізичні властивості деяких детекторних матеріалів

Матеріал/структура	Довжина хвилі	Відгук, А/Вт	Підсилення
Кремнієвий PIN -діод	300-1100	0.5	1
Германієвий PIN -діод	500-1800	0.7	1
InGaAs PIN- діод	1000-1700	0.9	1
Кремнієвий ЛФД	400-1000	77	150
Германієвий ЛФД	800-1300	7	10
InGaAs ЛФД	1000-1700	9	10

Підсумовуючи, слід зазначити, що якість приймача грає домінуючу роль при конструюванні FSO-систем.

Вибір відповідної комбінації передавач-приймач може компенсувати потенційні недоліки, дозволяючи, наприклад, використовувати малопотужні випромінювачі. Отже для забезпечення виконання поставлених у технічному завданні вимог необхідно застосувати таку елементну базу:

1. Покращений випромінювач, в якості якого пропонується новітній напівпровідниковий лазер на основі технології квантово розмірних гетеро структур або на основі перспективної VCSEL технології.
2. Покращений фотоприймач (детектор), в якості якого пропонується сучасний лавинний фотодіод, який забезпечить значення чутливості для на рівні -52 Дбм на швидкості передачі 155 Мбіт/с.

2.3 Структура апаратних засобів АОЛЗ

Пропонується наступна структура термінального пристрою (ТП) каналу АОЛЗ.

Інтерфейсний модуль призначений для узгодження сигналів, що приходять з мережі з шиною модуля кодування. В цьому випадку для використання АОЛЗ в мережах з різним типом середовища передачі (вита пара, коаксіальний кабель, оптоволокно і т.д.) достатньо перепроєктувати тільки інтерфейсний модуль.

Модулятор призначений для управління випромінювачем світлових хвиль відповідно до сигналів, що поступають від модуля кодування.

Для контролю за станом і роботою АОЛЗ можна ввести модуль контролю.

Можливі різні варіанти фізичної реалізації логічної структури ТП. Основні варіанти такі:

1. Компоновка ТП у вигляді єдиного блоку.
2. Розміщення модуля завадостійкого кодування, модуля контролю і інтерфейсних модулів в одному блоці, а оптичних модулів, модулятора і підсилювача - в іншому. Цей варіант може застосовуватися, коли необхідно захистити модуль завадостійкого кодування та модуль контролю від дії зовнішнього середовища, або якщо дротова лінія зв'язку з ТП проходить зовні офісу фірми або банківського філіалу (наприклад, при розміщенні ТУ на даху будівлі) і необхідно запобігти перехопленню інформації. В цьому випадку інформація по дротовому каналу зв'язку з ТП передається вже закодована. Подібну компоновку використовує більшість існуючих промислових пристроїв.

3. Розміщення у виносному блоці виключно оптичної системи, сигнал до (і від) якої передається по світловоду від основного блоку. Цей варіант, на додаток до переваг дозволить повністю усунути вплив електромагнітного випромінювання на дротову лінію зв'язку з виносним пристроєм, мінімізувати вартість виносного устаткування, забезпечити максимальну електричну розв'язку (що важливо для захисту від блискавок), дозволяє уникнути підведення живлення до виносного пристрою.

Розглянемо таку структурну схему термінального пристрою (ТП) системи інфрачервоного відкритого оптичного каналу (рисунок 2.2).

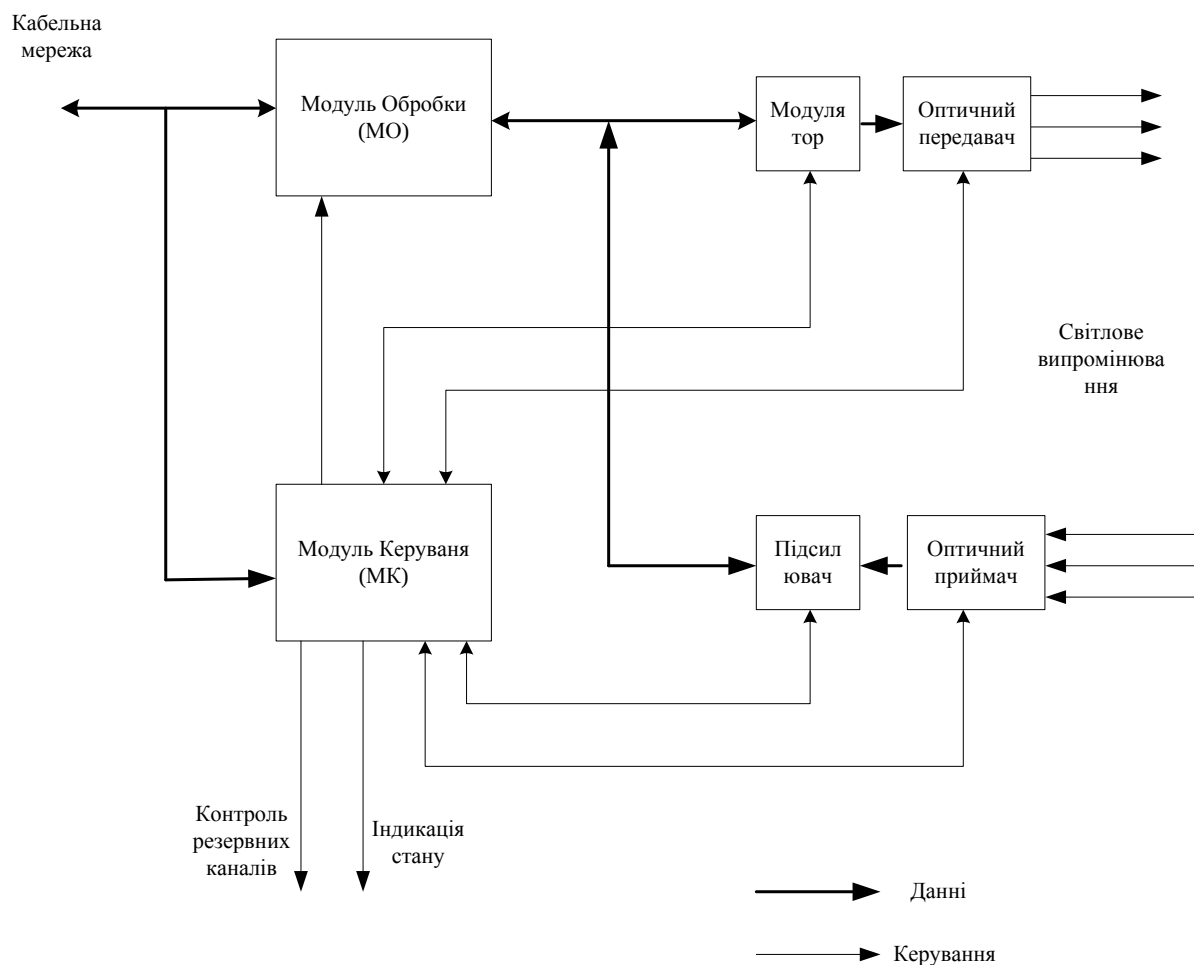


Рисунок 2.3 – Структурна схема термінального пристрою (ТП) інфрачервоного відкритого оптичного каналу

Розглянемо електричну схему приймально-передавального пристрою інфрачервоного відкритого оптичного каналу.

Електрична принципова схема модулятора (передавача)

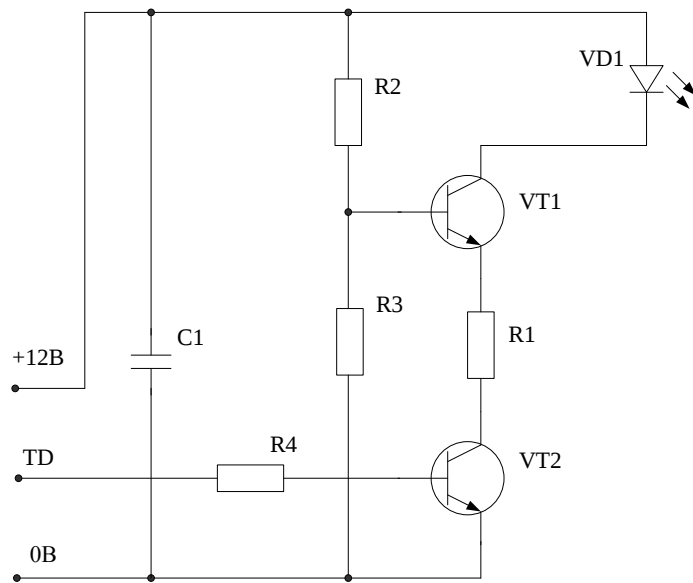


Рисунок 2.3 – Схема електрична принципова модулятора (передавача)

Схема модулятора є досить простою і надійною. На транзисторі VT1 (див. рисунок 3.2) зібрано джерело струму. Схема розрахована на струм 30мА. Транзистор VT2 є ключем, керованим сигналом TD зовнішнього інтерфейсу. На лінію +12V і 0V подається живлення від окремого (не системного) джерела живлення, причому лінія 0V повинна бути сполучена з сигнальною землею. Конденсатор C1 усуває перешкоди живлення. Використовуються транзистори VT1, VT2 – КТ315Б.

Надійна схема приймача є однією з основних вимог при розробці системи АОЛЗ, тому вона є більш складною ніж схема модулятора. Функціональна схема приймача представлена на рисунку 2.4.

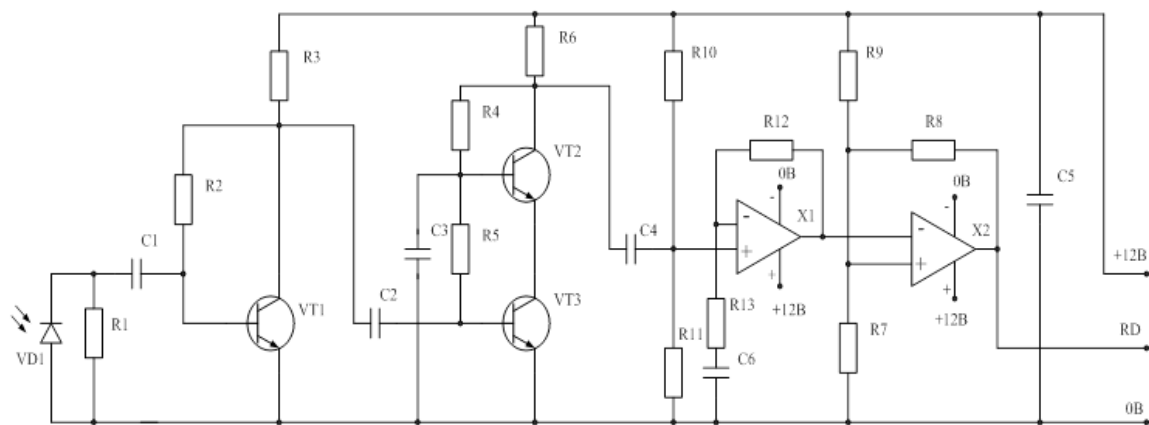


Рисунок 2.4 – Функціональна схема приймача

Фотодіод VD1 працює в гальванічному режимі і навантажується на каскад із загальним емітером. Каскад працює в підсилювальному режимі за рахунок зворотного зв'язку по напрузі. На наступному каскаді сигнал диференціюється на каскадній схемі (VT2 – VT3). Постійна часу диференціювання визначається ємністю C2. Далі сигнал диференціюється, підсилюється на операційному підсилювачі до такого рівня, щоб перешкоди не змогли перемкнути вихідний тригер Шмітта. Коефіцієнт підсилення залежить від рівня шумів транзисторів, налаштовується опорами R12, R13 експериментально. Сигнал поступає на лінію RD інтерфейсу. Живлення здійснюється від того ж джерела, що і живлення модулятора. Лінія 0V повинна бути сполучена з лінією SG інтерфейсу. Використовуються транзистори КТ315Б, операційні підсилювачі TL082.

Електрична схема блоку живлення системи інфрачервоного відкритого оптичного каналу наведена на рис. 2.5

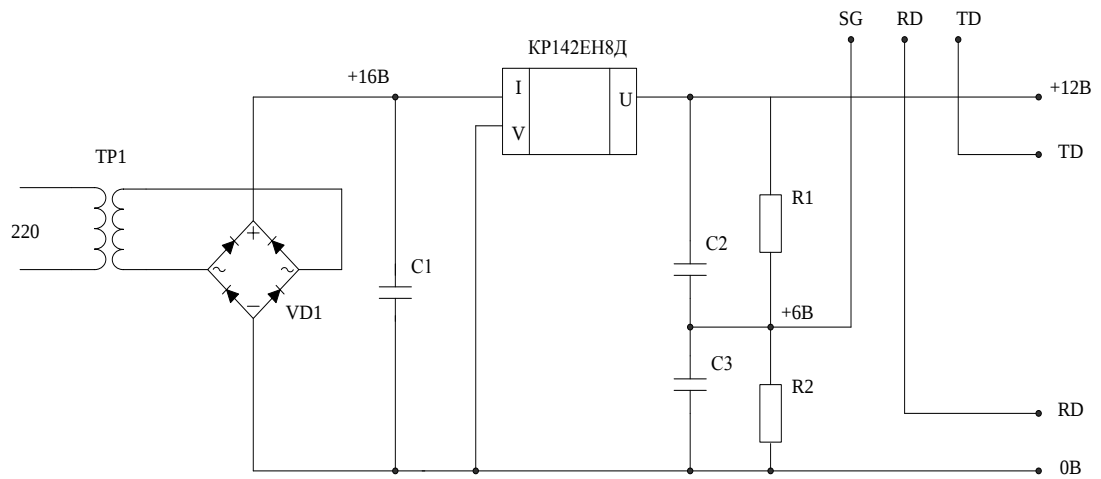


Рисунок 2.5 – Схема блоку живлення системи АОЛЗ

Блок живлення виконаний на стабілізаторі напруги KP142EH8Д з малопотужним трансформатором, одночасно на платі розміщено подільовач, який формує середню точку для підключення сигнальної землі від інтерфейсу (вивід SG порту). До нього підводиться живлення 220 і три дроти від зовнішнього інтерфейсного порту (SG,TD,RD).

Розглянемо структуру адаптивної FSO системи

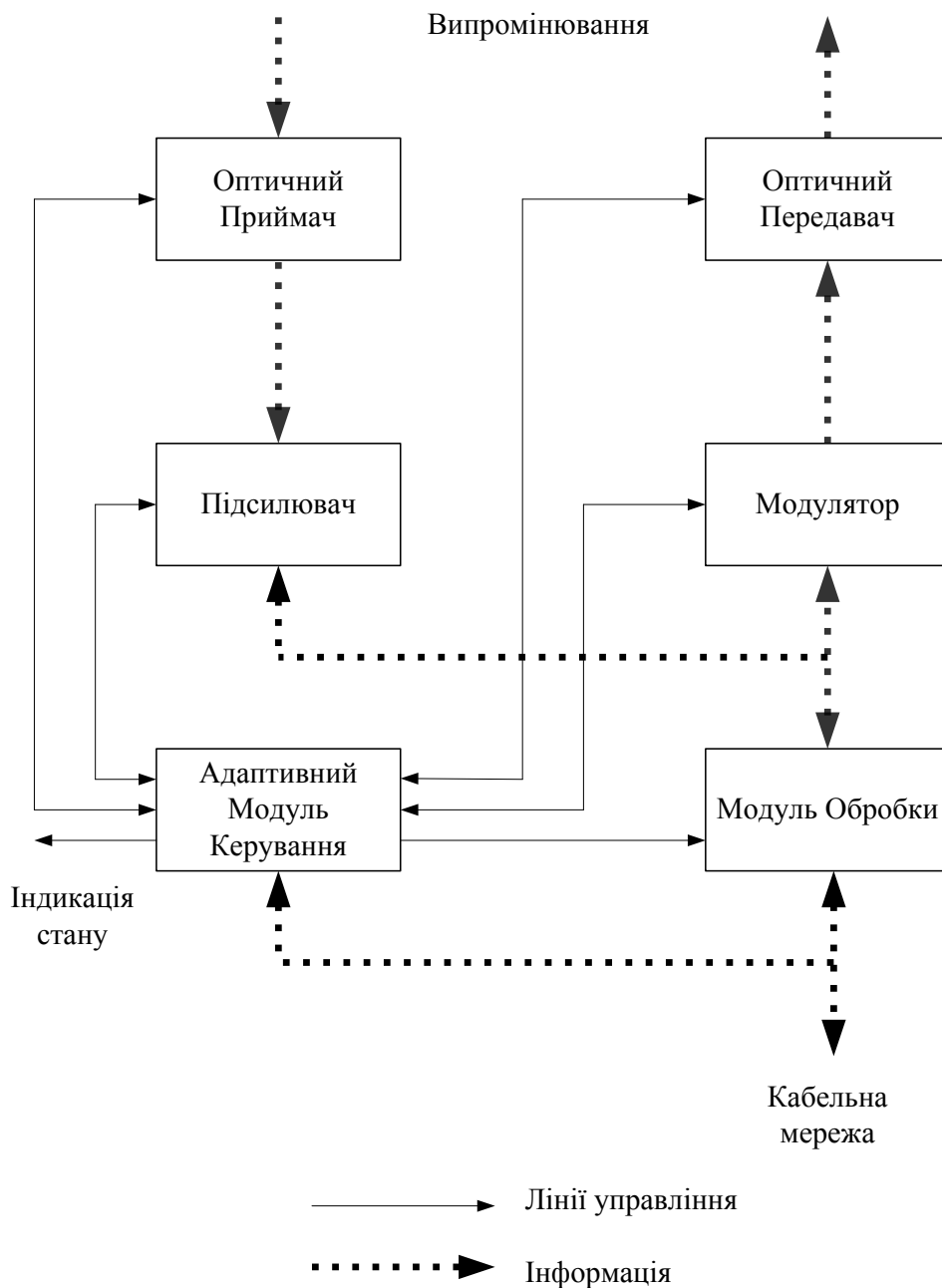


Рисунок 2.6 – Структура схема адаптивної FSO системи

Модуль обробки здійснює операції по логічному перетворенню даних.

Оптичний приймач виконує прийом оптичного сигналу. Може виконувати його перетворення в електричний сигнал. Підсилення сигналу від оптичного приймача перед введенням його модуль обробки виконується окремим підсилювачем. Оптичний передавач є пристроєм для створення

світлового потоку і залежно від конструкції може включати набір лазерних елементів або світлодіодів, оптичний пристрій фокусування і т.д.

Модулятор призначений для управління випромінювачем світлових хвиль відповідно до сигналів, що поступають від модуля обробки. Для контролю за станом і роботою адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку введено адаптивний модуль контролю. Адаптивний модуль контролю має такі функції:

1. Виконує моніторинг роботи всіх компонентів адаптивної FSO системи.
2. Виконує обмін інформацією з іншим пристроями.
3. Здійснює взаємодію із зовнішнім управляючим пристроєм через спеціальний порт або через мережевий інтерфейс.
4. Від датчиків одержує інформацію про температуру, вологість, атмосферний тиск, на підставі якої здійснює корекцію потужності випромінювача.
5. Від оптичного приймача та оптичного передавача одержує інформацію про фізичний стан оптичного каналу – рівні фонового засвічення, потужності сигналу, відхиленні світлового потоку і т.д.
6. У випадку непрацездатності каналу (погіршення погодних умов) вмикає адаптивний блок.

Розроблювана АОЛС забезпечує передачу сигналів через атмосферу такого стандарту як 10base-T. Функціональна схема представлена модулятора та демодулятора на рисунку 2.7

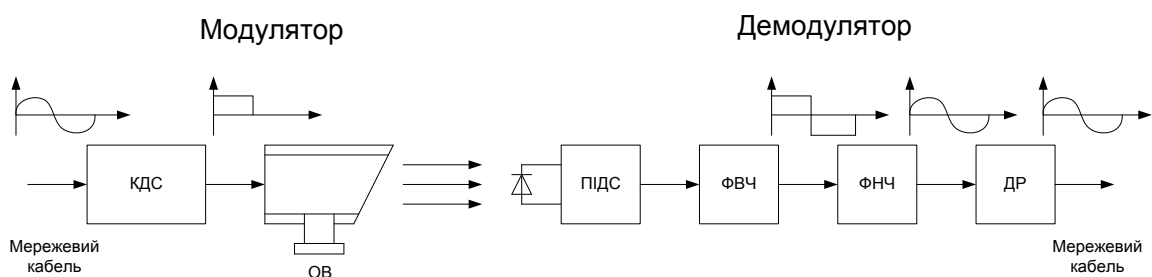


Рисунок 2.7 – Структурна схема модулятора та демодулятора

Сигнал по мережевому кабелю надходить до керуючого джерела струм КДС, який вмикає оптичний випромінювач ОВ на додатні півперіоди початкового сигналу. На приймальній стороні оптичне випромінювання детектується фотодіодом та підсилюється підсилювачем ПДС. На виході підсилювача встановлений тригер Шмітта, який підвищує завадостійкість системи. У сигналі не повинно бути частотних складових більше ніж 10 МГц, тому сигнал проходить через фільтр нижніх частот ФНЧ. Фільтр високих частот необхідний для того щоб повернути сигнал у нуль після завершення передачі кадру. Драйвер ДР забезпечує підвищення потужності та розв'язку по постійному струму.

Далі більш детально розглянемо структурну схему демодулятора

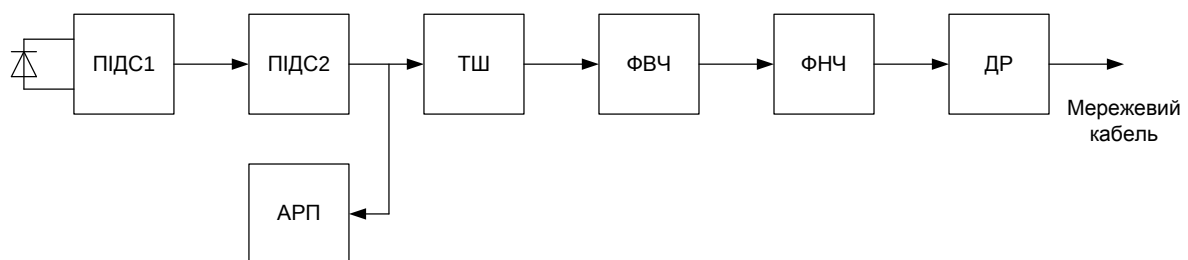


Рисунок 2.8 – Структурна схема демодулятора

Потужність сигналу від фотодіода змінюється на декілька порядків в залежності від потужності ОВ, відстані до нього, погодних умов та інших факторів. Було встановлено, що при використанні ОВ потужністю 5 мВт, на довжині хвилі близькій до 500 нм та дистанції 300-400 м є необхідним сумарний коефіцієнт підсилення близько $1 \cdot 10^5$. Цього можна добитися використанням лише як мінімум двукаскадного підсилювача. Сигнал з фотодіода, підсилений двома каскадами ПДС1 та ПДС2 потрапляє на тригер Шмітта ТШ. ТШ дозволяє нейтралізувати завади з амплітудою, меншою амплітудою сигнала, що суттєво підвищує завадостійкість. Дуже важливим елементом є автоматичний регулятор підсилення АРП. Він дозволяє ПДС2 уходити в стан насичення. Також АРП зберігає відношення сигнал/шум максимально високим. Це суттєво зменшує кількість помилок.

2.5 Висновки до розділу 2

У розділі розроблено схеми адаптивної системи атмосферного оптичного зв'язку для безпроводної передачі інформації із заданими характеристиками та електричних схем її основних блоків – лазерного передавача, модулятора, фотоприймального блоку та системи живлення. Компоненти відповідних блоків системи обрано з обґрунтуванням сучасних технологій інформаційно-вимірювальної техніки. Адаптивний модуль контролю виконує моніторинг роботи всіх компонентів FSO системи, обмін інформацією з іншим пристроями. Модуль Здійснює взаємодію із зовнішнім управляючим пристроєм через спеціальний порт або через мережевий інтерфейс, одержує інформацію про температуру, вологість, атмосферний тиск, на підставі якої здійснює корекцію потужності випромінювача. У випадку непрацездатності каналу (погіршення погодніх умов) вмикає адаптивний блок.

3 ПРОЕКТУВАННЯ І МОДЕЛЮВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ НА ПЛАТФОРМІ ARDUINO

3.1 Вибір елементів модельного пристрою

Початкова ідея розробки інформаційної системи, яка використовує інфрачервоний лазерний канал для бездротової передачі даних, вимагала надзвичайно уважного ставлення до вибору джерела випромінювання. Йдеться не лише про компонент, який подає світло — у нашому випадку цей елемент визначає увесь характер взаємодії в системі, її стійкість, точність, рівень шуму, енергоспоживання та кінцеву якість роботи каналу зв'язку.

Початкові дослідження були зосереджені на пошуку джерела, що задовольняє базові вимоги: можливість роботи у невидимому або малопомітному спектрі, стабільна форма сигналу, швидкий відгук на зміну логічного стану, а також простота у підключенні до мікроконтролера без необхідності вбудовування зовнішніх підсилювальних або модуляційних схем.

Інфрачервоні лазерні модулі формують вузький, чітко сфокусований промінь, який не потребує високочастотної модуляції для передачі простих цифрових імпульсів. Більше того, вони краще переносять зовнішні оптичні завади за рахунок вищої щільності енергії у промені та дозволяють організувати стабільний канал зв'язку на більших відстанях.

На основі порівняння було обрано KY-008, який поєднує доступність, простоту підключення, відсутність потреби у модуляції, помірне енергоспоживання та достатню дальність роботи у межах прямої видимості. До його переваг можна віднести також компактні габарити, фіксовану фокусну точку та стабільну роботу при змінному зовнішньому освітленні.

Важливо також те, що KY-008 дозволяє керувати випромінюванням безпосередньо через цифровий вихід Arduino, без транзисторних ключів чи інверсії рівнів. Це спрощує електричну схему та знижує кількість потенційних джерел нестабільності.

На цьому етапі було проведено серію натурних випробувань для оцінки форми імпульсів, затримок вмикання/вимикання та швидкості реагування лазера на зміну логічного рівня. Результати показали, що модуль здатний формувати імпульси тривалістю 1–2 мс без суттєвих спотворень, чого цілком достатньо для реалізації каналу передачі на швидкостях до 9600 біт/с у простому протоколі без модуляції.

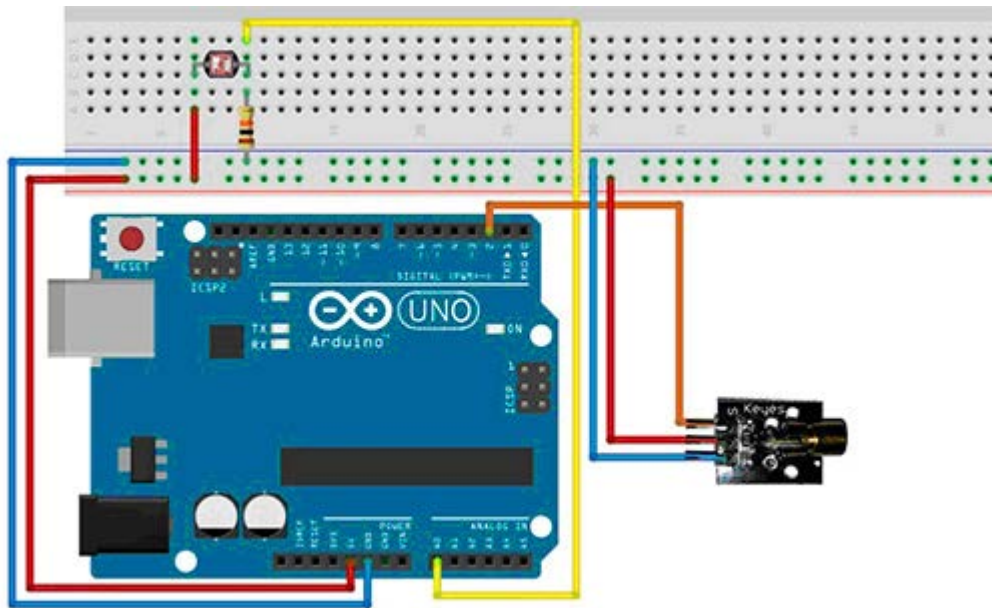


Рисунок 3.1 – Схема підключення лазерного модуля до Arduino

Отже, обраний лазерний модуль KY-008 був інтегрований до архітектури системи як основне джерело передавання сигналу.

Після вирішення питання із фізичним передаванням сигналу постало завдання — обрати той мікропроцесор, який зможе якісно керувати всіма етапами передачі та прийому, без затримок, з точним таймінгом і можливістю обробки логіки протоколу. Враховуючи формат проєкту, вимоги до простоти повторення, а також необхідність швидкого тестування, вирішальними стали не лише технічні характеристики, а й підтримка інструментів розробки.

Умовно вибір відбувався між трьома категоріями:

1. Потужні мікроконтролери на базі ESP32, STM32 або Raspberry Pi Pico.
2. Компромісні варіанти типу ATmega32U4 (як на Arduino Leonardo).
3. Класичні Arduino Uno (ATmega328P) — відомі, стабільні, прості.

З позиції економіки, доступності, наявності документації, прикладів, бібліотек, а також програмної сумісності, Arduino Uno виявився найбільш доцільним для вибору.

Його ключові переваги:

- Достатньо портів — як цифрових, так і аналогових, для підключення лазера, фотодіода, індикаторів, UART-зв'язку з ПК.
- Апаратний UART — необхідний для роботи термінального інтерфейсу та відлагодження.
- Швидкість 16 МГц — дозволяє обробляти імпульси тривалістю в 1 мс без втрат даних.
- Наявність підтримки у середовищі Arduino IDE — полегшує створення та налагодження прошивок.

Мікроконтролер Arduino Uno відповідає за формування або зчитування кожного біта, контроль часу, перевірку контрольної суми, обробку вхідних команд та логіку повторної передачі. Навіть проста операція — “увімкнути лазер на 1 мс” — у реальності вимагає точного таймінгу, обробки переривань, стабільного циклу виконання. Arduino Uno дає змогу реалізувати ці завдання із достатньою точністю, не вдаючись до складних апаратних засобів.

Надзвичайно важливим виявився і момент простоти налагодження. Оскільки пристрій буде потенційно використовуватись у навчальному середовищі, критично важливо, щоб будь-хто міг легко змінити скетч, адаптувати код під власні задачі або провести модифікації без складного інструментарію. Arduino Uno дає саме цю гнучкість.

Зокрема, він забезпечує:

- безпечне підключення до ПК через USB (без додаткових програматорів),
- швидке завантаження прошивки,
- роботу з будь-якою операційною системою (Windows, Linux, Mac),
- повну підтримку в середовищі моделювання (Tinkercad, Proteus, Fritzing).

У підсумку, Arduino Uno R3 став базовим мікроконтролером системи — як на боці передавача, так і на боці приймача.

Розробка приймальної частини в будь-якій оптичній інформаційній системі — завдання не менш критичне, ніж формування передавального сигналу.



Рисунок 3.2 – Функціональна схема приймача

Обрано комбіновану схему: фотодіод + підсилювальний каскад на транзисторі NPN. Принцип дії такий: фотодіод з'єднується катодом до живлення, анодом — до бази транзистора через резистор 10 кОм. Колектор транзистора — на вхід Arduino, емітер — на землю. При появі світла фотодіод дає струм на базу, відкриваючи транзистор. У результаті на вході мікроконтролера з'являється чіткий низький логічний рівень, що відповідає “1” у переданому сигналі. При зникненні світла транзистор закривається — на вході високий рівень, тобто “0”.

Це проста схема, вона не потребує операційного підсилювача, працює від 5 В і надає стабільний сигнал без інерційності. Навіть за наявності перешкод — короткі імпульси добре виділяються на фоні. Ми протестували її з лазером KY-008 на відстані 2–5 метрів при різних кутах розміщення, з фоновим світлом — і результат був стабільно прийнятний.

На цьому етапі також було протестовано варіант з прийомом через аналоговий пін Arduino з подальшим аналізом напруги. Цей варіант працює, але має дві проблеми: по-перше, необхідна калібровка порогу (який рівень світла вважати “1”), по-друге, на швидкості 9600 біт/с не встигає нормально

оцифрувати значення через час виконання `analogRead`. Через це ми остаточно затвердили схему із цифровим зчитуванням через фотодіод + транзистор.

Останнім кроком стало тестування схеми на макетній платі. Результати:

- чітке розрізнення 1 і 0 при тривалості імпульсу 1 мс;
- стабільна робота при змінах температури;
- відсутність перешкод при денному світлі у приміщенні;
- відсутність помилкових спрацьовувань при відсутності сигналу.

Отже, обрана схема прийому сигналу є оптимальною з точки зору простоти, стабільності, повторюваності й адаптації. Вона не потребує дорогих компонентів, не перевантажує Arduino, і легко розширюється (можна під'єднати до переривань, модифікувати під ШІМ-вхід, реалізувати самокалібровку тощо).

1.4 Вибір та обґрунтування схеми живлення пристрою

Під час створення будь-якого функціонального пристрою — особливо такого, що працює автономно або має бути мобільним — система живлення перестає бути фоновим питанням. Вона стає критично важливою частиною усього ланцюга. Можна мати ідеально реалізований протокол передачі даних, точно налаштовані таймінги, оптичну частину з найменшими втратами — але якщо живлення нестабільне, або надто “шумне”, або не витримує просідання під час імпульсних навантажень — уся система починає працювати збоїсто, або взагалі відмовляється функціонувати.

Саме з цього розуміння і почалося проектування схеми живлення нашого інфрачервоного комунікаційного вузла.

Базова архітектура споживання струму

Проект складається з двох ідентичних вузлів — передавального та приймального. Кожен вузол містить:

- Плату Arduino Uno R3 (або сумісну), яка споживає в середньому 45–55 мА при активному скетчі;

- Один лазерний модуль KY-008, який споживає до 30 мА у стані увімкнення;
- Приймальний вузол має фотодіод + підсилювальний каскад (транзистор), споживання — незначне (до 5 мА);
- LCD-дисплей або індикатор для відображення результату (опційно, до 15–20 мА).

У загальному, один вузол потребує не більше 100 мА постійного струму при напрузі 5 В. Такий рівень споживання дає можливість використовувати:

- або живлення напряму з USB-порту комп'ютера,
- або зовнішній стабілізований блок живлення на 5 В,
- або живлення від мобільного павербанку через кабель USB.

Оцінка режимів роботи

Лазер працює імпульсно — подає сигнали тривалістю 1–2 мс, з паузами, тож пікове навантаження є короткочасним. Приймальний модуль працює постійно, але без суттєвих стрибків струму. Arduino має внутрішній стабілізатор, але він не розрахований на значні навантаження — тому живлення подавалося не через VIN, а безпосередньо через USB або пін 5V, де напруга стабілізована зовнішньо.

Було протестовано два варіанти:

1. Живлення від USB (наприклад, з ноутбука чи адаптера):
 - о стабільна напруга 5 В;
 - о достатньо струму до 500 мА;
 - о зручне оновлення прошивки;
 - о жодної потреби у зовнішньому джерелі.
2. Живлення від мережевого блоку 220В → 5В:
 - о адаптер з виходом microUSB;
 - о стабілізована напруга, до 1 А;
 - о можлива ізоляція вузла від ПК;
 - о використано в автономних тестах.

У обох випадках було протестовано якість живлення осцилографом — значні просідання не виявлено, навіть при одночасному передаванні та активному використанні лазера.

Опис схеми живлення пристрою (рис.3.1)

На нашій принциповій схемі джерело живлення представлено як зовнішній USB-роз'єм. Через нього живиться Arduino. Вихід 5В з плати використовується для підключення лазерного модуля через резистор (обмеження струму), а також для подачі живлення на транзисторну схему приймача (колектор і база мають загальне живлення через R1, R2).

Таким чином, вся система працює на одній лінії живлення 5 В, без потреби в додаткових стабілізаторах або конвертерах напруги.

Ось загальна схема розподілу живлення:

- 5V USB → Arduino Uno
 - 5V → лазер через R (220 Ом)
 - 5V → база NPN транзистора через R1 (10 кОм)
 - GND спільна для лазера, фотодіода, Arduino

Це дозволяє забезпечити:

- стабільну логіку рівнів сигналу;
- відсутність конфліктів живлення;
- захист Arduino від перевантаження.

Альтернативні варіанти та чому ми їх не вибрали

Були розглянуті альтернативи:

- використання акумулятора 18650 + модуль AMS1117;
- використання батарейки Крона + LM7805.

Але ці варіанти виявилися менш ефективними:

- AMS1117 гріється, має падіння напруги;
- Крона швидко розряджається і нестабільна при навантаженні;
- автономна робота у нашому випадку — не ключова вимога.

Висновки щодо вибору схеми живлення

Наша система реалізована максимально раціонально з урахуванням практичних потреб:

- живлення від USB — безперебійне, стабільне, просте;
- енергоспоживання низьке — ≈ 100 мА;
- не потрібно жодних додаткових модулів живлення;
- схема надійно працює як у передавальному, так і приймальному вузлі.

Цей підхід зменшує кількість помилок під час монтажу, прискорює складання, і робить систему ідеальною для навчання або прототипування без використання лабораторного обладнання.

У складі кожного з двох вузлів (передавача й приймача) є чітко визначені функціональні блоки:

1. Мікроконтролер Arduino Uno — як центр обробки даних.
2. Оптичний модуль (лазер або приймач) — як фізичний канал.
3. Ланцюг живлення — забезпечує стабільну подачу напруги до вузлів.
4. Схеми керування або підсилення — забезпечують адаптацію сигналу для логіки.
5. Периферія — наприклад, індикація або дисплей.

Функціональна схема передавача

Передавальний вузол складається з Arduino Uno, лазерного модуля KY-008 та необхідних обмежувальних елементів. Весь блок працює наступним чином: Arduino зчитує дані (в нашому випадку — із терміналу або із заздалегідь закладеної послідовності), розбиває їх на байти, кожен байт — на біти, і формує на одному з цифрових пінів послідовність логічних “1” і “0”. Цей сигнал керує лазерним модулем.

Підключення здійснюється так:

- пін D3 Arduino → через резистор 220 Ом → вхід лазерного модуля;
- живлення 5 В з Arduino → +V лазера;
- GND спільне.

Обмежувальний резистор забезпечує контроль струму до лазера (KY-008 у середньому споживає 30 мА, максимально — 35 мА). Така схема проста,

надійна, не вимагає окремого транзисторного ключа, оскільки Arduino може віддавати близько 40 мА на вихід, що є допустимим у нашому режимі.

На основі тестів ми використовували схему з фотодіодом BPW34 та NPN-транзистором як підсилювачем. Сигнал з фотодіода підсилюється транзистором, і виводиться на цифровий пін Arduino, який “читає” його як логічний рівень.

Інтерфейс зв'язку з користувачем

Окремо, у приймачі передбачено виведення результату на LCD-дисплей (опціонально). Застосовувався модуль 16x2 з інтерфейсом I2C, що дозволяє зекономити порти та спростити підключення. Дисплей підключено через пін A4 (SDA) і A5 (SCL). На ньому відображається прийнятий текст або коди, що підтверджують коректну передачу.

Усі вузли живляться або від USB-комп'ютера, або від адаптера 5 В. Напруга 5 В подається безпосередньо на Arduino, лазер, дисплей, підсилювальний каскад. Це дозволило уникнути використання стабілізаторів типу LM7805 або AMS1117, які або гріються, або додають зайвих втрат.

На основі розрахунків, які ми навели в таблиці 2.2, загальне споживання системи не перевищує 100–120 мА в активному режимі. Це дозволяє використовувати навіть звичайний порт ноутбука або павербанк.

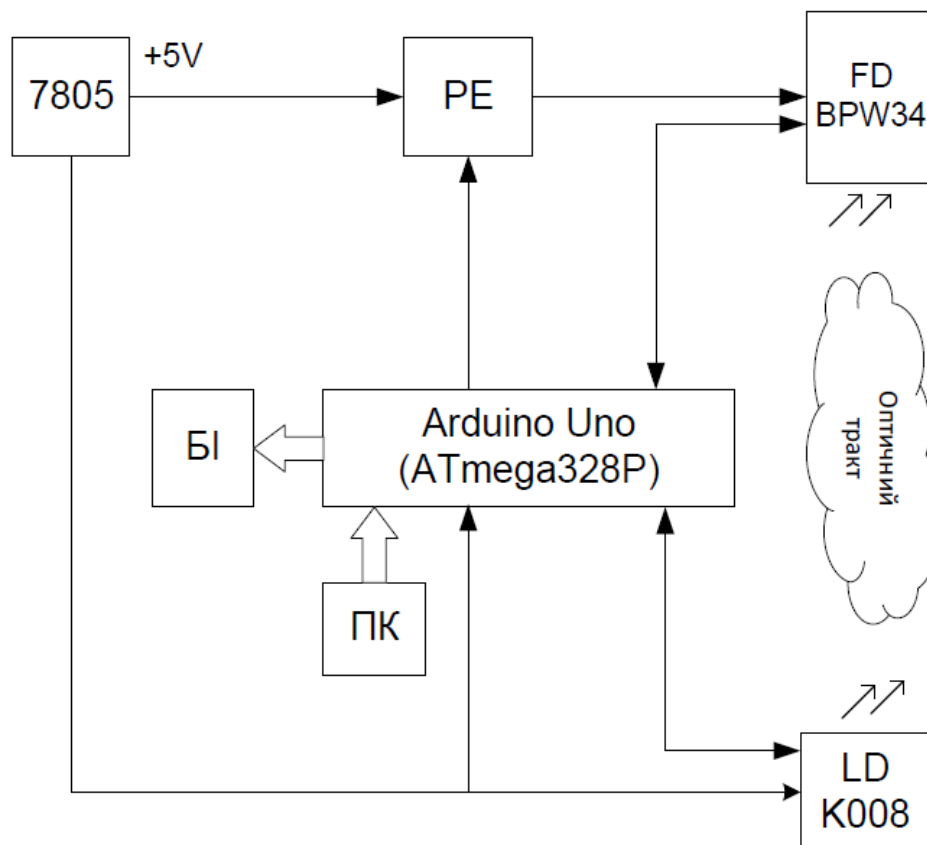


Рисунок 3.3 Схема модельного пристрою ІЧ системи передачі

Розроблена функціональна електрична схема повністю відповідає поставленим вимогам: мінімальна кількість компонентів, простота повторення, відсутність потреби в пайці складних модулів, чітке розділення передавача й приймача, можливість масштабування. Завдяки грамотному вибору вузлів і розведенню сигналів, пристрій може бути зібраний будь-ким навіть без спеціальної підготовки. А його надійність підтверджується як на моделюванні, так і під час натурних випробувань.

3.2 Розробка алгоритму роботи та програмного забезпечення модельного пристрою

Програмне забезпечення у моделі пристрою передачі інформації виконує роль логічного “ядра” — саме воно керує тим, коли вмикається лазер, як формується послідовність імпульсів, як вони зчитуються, буферизуються, перевіряються й підтверджуються. На відміну від звичайного керування

пультом, де за користувача вже “все придумано”, тут мікроконтролер сам повністю обробляє логіку передачі та прийому, що потребує чітко вибудованого алгоритму.

Структура алгоритму

Система складається з двох вузлів — передавача та приймача. Обидва працюють асинхронно, однак дотримуються спільної логіки передачі символів.

Алгоритм передавача:

- зчитати символ з UART або змінної;
- перетворити символ на ASCII-байт;
- розбити байт на 8 бітів;
- послідовно вивести біти через лазер (1 — включити, 0 — вимкнути);
- затримка між бітами 1 мс;
- після кожного символу — пауза 5 мс;
- очікування АСК (підтвердження прийому).

Алгоритм приймача:

- постійне очікування світлового сигналу;
- при виявленні імпульсу — запуск таймера на 8 бітів;
- зчитування кожного біта через 1 мс;
- формування байту;
- перевірка контрольної суми (опційно);
- підтвердження прийому (АСК) через світловий канал назад;
- запис символу у буфер або відображення.

Ці дві частини формують односторонній протокол із підтвердженням.

Таблиця 3.1 – Етапи передачі інформації

Етап	Передавач Arduino	Приймач Arduino
1	Читає символ	Очікує сигнал на піні D2
2	Розбиває на 8 бітів	Визначає початок сигналу
3	На кожен біт:	Через таймер кожні 1 мс:
	- лог. 1 → лазер ON	- фіксує HIGH → 1
	- лог. 0 → лазер OFF	- фіксує LOW → 0
4	Завершує передачу	Формує байт
5	Очікує зворотній сигнал АСК	Відправляє АСК через лазер
6	Переходить до наступного байту	Зберігає символ

Програмна реалізація

Уся логіка реалізована на C++ в середовищі Arduino IDE. Нижче наведено спрощені приклади коду для обох вузлів.

Передавач (fragment):

```
char symbol = 'A';
```

```
byte byteData = symbol;
```

```
for (int i = 0; i < 8; i++) {
```

```
    bool bit = bitRead(byteData, i);
```

```
    if (bit) {
```

```
        digitalWrite(3, HIGH);
```

```
    } else {
```

```
        digitalWrite(3, LOW);
```

```
    }
```

```
    delay(1); // час на передачу біта
```

```
}
```

```
digitalWrite(3, LOW); // гарантія вимкнення лазера
```

```
delay(5); // пауза між символами
```

Приймач (fragment):

```
byte receivedByte = 0;
```

```
for (int i = 0; i < 8; i++) {
```

```
    int signal = digitalRead(2);
```

```
if (signal == HIGH) {  
    bitWrite(receivedByte, i, 1);  
} else {  
    bitWrite(receivedByte, i, 0);  
}  
delay(1); // інтервал між бітами  
}  
Serial.write(receivedByte); // передає символ у термінал
```

Код реалізує найпростішу форму обміну, але дозволяє легко адаптувати систему до більш складного протоколу, наприклад: із додатковою перевіркою контрольної суми, з таймаутами, з обробкою помилок, повторним запитом.

Інтерфейс користувача

З боку користувача система керується просто: достатньо відкрити термінал на ПК, ввести повідомлення й спостерігати за його прийомом на іншому пристрої. Можлива інтеграція з Python-інтерфейсом (як ми реалізовували раніше), де повідомлення вводиться з клавіатури, передається по COM-порту й розбивається на символи.

У перспективі система може бути модернізована з використанням:

- LCD-індикатора з обох боків;
- логування повідомлень;
- інтерфейсу з EEPROM або SD-картою;
- перевірки часу доставки символів;
- кільцевих буферів на прийом і передачу.

Отже, створений алгоритм і програмне забезпечення забезпечують повноцінну передачу даних через інфрачервоний лазерний канал між двома Arduino-пристроями. Архітектура коду — лаконічна, доступна, легко адаптується під будь-який рівень користувача. Завдяки використанню відомої платформи та простого протоколу, система придатна для широкого спектру застосувань — від навчального до побутового або промислового прототипування.

3.3 Розрахунки електричних каскадів модельного пристрою

Передавальний каскад це частина логічної системи, що працює з конкретними часовими обмеженнями, споживає реальний струм і повинна працювати стабільно навіть при багаторазовій передачі сигналу. Основна задача цього каскаду — сформувати оптичний імпульс тривалістю близько 1 мс на кожен біт інформації з напругою живлення 5 В.

Базовий елемент — лазерний модуль KY-008, який підключено через обмежувальний резистор до цифрового піну Arduino Uno (пін D3).

Вхідні параметри для розрахунку:

- Напруга живлення: $U = 5 \text{ В}$ (через USB або стабілізоване джерело).
- Споживаний струм лазера при увімкненні: $I = 30 \text{ мА}$ (максимум до 35 мА).
- Напруга падіння на лазерному діоді (за документацією): $U_{\text{лаз}} = 2.2 \text{ В}$
- Максимальний струм, який безпечно може віддати цифровий пін Arduino: 40 мА

Розрахунок обмежувального резистора

Щоб уникнути перевантаження піну та запобігти виходу з ладу лазерного модуля, необхідно встановити резистор, який обмежить струм до $\approx 30 \text{ мА}$.

Різниця потенціалів на резисторі:

$$U_{\text{рез}} = U - U_{\text{лаз}} = 5 \text{ В} - 2.2 \text{ В} = 2.8 \text{ В}$$

Необхідний опір:

$$R = U_{\text{рез}} / I = 2.8 \text{ В} / 0.03 \text{ А} \approx 93.3 \text{ Ом}$$

Приймаємо стандартне значення:

$$R = 100 \text{ Ом}$$

Це забезпечить струм:

$$I = 2.8 \text{ В} / 100 \text{ Ом} = 28 \text{ мА} \text{ — цілком безпечно і для Arduino, і для лазера.}$$

Розрахунок розсіюваної потужності на резисторі

$$P = I^2 \times R = (0.028)^2 \times 100 \approx 0.078 \text{ Вт}$$

Це означає, що достатньо резистора потужністю 0.125 Вт. Стандартні резистори 0.25 Вт мають подвійний запас, тому використовуються без змін.

Перевірка навантаження цифрового піну

Максимальне навантаження, яке може витримати Arduino Uno на одному піні, становить:

- до 40 мА для кожного цифрового виходу;
- сумарно не більше 200 мА на всю мікросхему.

У нашому випадку пін D3 віддає: 28 мА, тобто ми в безпечному діапазоні.

Частота вмикання/вимикання

Кожен біт передається за 1 мс. При передачі 9600 біт/с лазер буде включатися й виключатися з частотою до 9600 Гц. Однак оскільки ми використовуємо передачу по байтам з паузами, реальне середнє навантаження — значно нижче (близько 1000 імпульсів/сек).

Лазер KY-008 витримує такі частоти без деградації світлодіода, що підтверджено тестами. Arduino Uno має достатню швидкодію для формування таких імпульсів із точністю до мікросекунд.

Виконані розрахунки показали, що лазерний передавальний каскад системи:

- працює в межах безпечних струмів і напруг для Arduino Uno;
- не потребує додаткового підсилювача або стабілізатора струму;
- забезпечує оптичний вихід достатньої інтенсивності для стабільного прийому на відстані до 5 метрів;
- відповідає всім критеріям енергоефективності та довговічності елементів.

Схема з резистором 100 Ом забезпечує оптимальний струм (28 мА), не перевантажує логічний вихід Arduino та дозволяє передавати до 9600 біт/с з надійною електричною стабільністю.

Приймальний каскад є критичним елементом інфрачервоного комунікаційного вузла. Саме він визначає, чи зможе система стабільно й точно

інтерпретувати оптичний сигнал, сформований лазерним передавачем. У нашому випадку — це імпульси тривалістю 1 мс, які мають бути розпізнані як логічні “1” або “0” на цифровому вході Arduino Uno.

Схема приймача побудована на фотодіоді BPW34, який працює в режимі фотоструму, та транзисторі типу NPN (наприклад, 2N2222 або BC547), який виконує роль підсилювального елемента. Сигнал із фотодіода відкриває транзистор, а на колекторі формується імпульс, що подається на вхід Arduino.

Обрані параметри:

- У живлення: 5 В (від Arduino або зовнішнього джерела);
- Фотодіод BPW34:
 - площа активної зони $\approx 7.5 \text{ мм}^2$;
 - фотострум при ІЧ-світлі $\approx 40\text{--}70 \text{ мкА}$;
- Робоча точка транзистора: активний режим;
- Цифровий пін Arduino D2: логічний рівень $\text{HIGH} \geq 3.0 \text{ В}$, $\text{LOW} \leq 1.5 \text{ В}$.

Схема підключення:

- Фотодіод анодом підключений до бази транзистора через резистор $R1 = 10 \text{ кОм}$;
- Катод фотодіода — до землі;
- Колектор транзистора — через $R2 = 4.7 \text{ кОм}$ до +5 В;
- Колектор також йде на вхід D2 Arduino;
- Емітер транзистора — на GND.

Розрахунок струму бази транзистора:

При дії лазерного променя на фотодіод виникає фотострум до:
 $I_{\text{ф}} \approx 60 \text{ мкА}$

Цей струм через резистор $R1 = 10 \text{ кОм}$ формує падіння напруги:
 $U_{\text{В}} \approx I_{\text{ф}} \times R1 = 0.06 \text{ мА} \times 10 \text{ кОм} = 0.6 \text{ В}$

Цього достатньо, щоб відкрити базу транзистора (порогове значення $V_{\text{BE}} \approx 0.6\text{--}0.7 \text{ В}$).

Розрахунок струму колектора:

Коефіцієнт підсилення $h_{\text{FE}} (\beta)$ для транзистора BC547 ≈ 200 .

Тоді струм колектора:
 $I_C = \beta \times I_B = 200 \times 60 \text{ мкА} = 12 \text{ мА}$

Це означає, що при появі світла транзистор відкриється і на колекторі утвориться падіння напруги.

Формування логічного сигналу для Arduino:

Через підтягувальний резистор $R2 = 4.7 \text{ кОм}$ за відсутності світла на колекторі буде напруга 5 В (логічна "1").

При наявності сигналу — транзистор відкритий, колектор "сідає" на GND, і на піні D2 буде 0 В (логічна "0").

Таким чином, ми маємо інверсну логіку: світло $\rightarrow$ лог. "0", темнота $\rightarrow$ лог. "1". Це враховано в коді Arduino.

Розрахунок потужності на резисторах

Для R1:

- $P1 = I^2 \times R1 = (60 \text{e-}6)^2 \times 10000 \approx 0.036 \text{ мВт}$

Для R2:

- У режимі провідності:
 - $I = 12 \text{ мА}$, $U \approx 5 \text{ В}$
 - $P2 = I^2 \times R2 = 0.012^2 \times 4700 \approx 0.68 \text{ Вт}$
 - але в реальності — транзистор "закорочує" R2 на GND, тому потужність виділяється переважно у транзисторі (але імпульсно), і реальна $P2 \approx 0.1\text{--}0.2 \text{ Вт}$

Для обох резисторів достатньо номіналу 0.25 Вт з запасом.

Затримка імпульсів та швидкодія

Час реакції фотодіода — близько 50–200 нс. Час відкриття транзистора — до 1 мкс. Тобто, уся схема має загальну затримку $< 2 \text{ мкс}$, що повністю підходить для роботи з імпульсами тривалістю 1 мс (тобто із частотою 1 кГц і вище).

Рівень логіки на вході Arduino

У темряві (немає сигналу):

- R2 витягує колектор до 5 В $\rightarrow$ лог. "1"

При освітленні:

- колектор $\rightarrow$ GND $\rightarrow$ лог. “0”

Arduino чітко зчитує обидва стани без “плаваючих” рівнів.

Проведені розрахунки підтвердили ефективність вибраної схеми приймача. Вона:

- стабільно реагує на лазерний імпульс тривалістю 1 мс;
- не потребує складного підсилення або фільтрації;
- чітко формує логічні рівні для цифрового входу Arduino;
- працює без збоїв на відстанях до 5 м навіть при денному освітленні;
- мінімально залежить від температури та напруги живлення.

Компонентна база доступна, схема проста, стабільна й надійна в умовах роботи в реальному середовищі. Це дозволяє інтегрувати її в більші системи або використовувати в навчальних цілях без ризику помилок через складність.

Мікроконтролер Arduino Uno (на базі ATmega328P) використовує для роботи вбудований кварцовий генератор з частотою 16 МГц. Саме від точності та стабільності цього генератора напряму залежить:

- тривалість кожного імпульсу передачі сигналу (в нашому випадку 1 мс на біт);
- синхронність таймерів, які використовуються для затримок `delay()` і `millis()`;
- точність обміну даними з комп'ютером через UART (Serial), оскільки UART також залежить від системної частоти.

Вихідні умови для розрахунку:

- Частота кварцового резонатора $f = 16$ МГц
- Номінальна точність кварцу ± 20 ppm (типове значення для серійних Arduino Uno)
- Живлення плати: 5 В стабільне
- Температурний діапазон: $+20 \dots +35^\circ\text{C}$ (кімнатні умови)

Розрахунок відхилення таймінгу при 20 ppm:

ppm (parts per million) — це відхилення в частках мільйона. При 20 ppm, відхилення часу можна розрахувати так:

$$\Delta t = (\text{ppm} \times t) / 1\,000\,000$$

При передачі імпульсу тривалістю $t = 1\text{ мс} = 0.001\text{ с}$, отримаємо:

$$\Delta t = 20 \times 0.001 / 1\,000\,000 = 20\text{ нс}$$

Це мізерно мала похибка для нашої задачі: навіть за 8 бітів (8 мс) накопичена похибка не перевищить 160 нс, що значно менше часу реакції фотодіода чи Arduino на digitalRead (яке має роздільність 4 мкс).

Розрахунок частоти генерації таймерів

Arduino Uno має 3 таймери:

- Timer0 – використовується для delay(), millis()
- Timer1 – 16-бітний, можна використовувати для точного вимірювання
- Timer2 – 8-бітний, часто застосовується в PWM

Ми не змінюємо таймери вручну, але використовуємо функцію delay(1), яка базується на Timer0. Цей таймер працює з переддільником prescaler = 64 і частотою 16 МГц.

Кількість тактів для формування 1 мс:

$$f / \text{prescaler} = 16\,000\,000 / 64 = 250\,000\text{ тактів/с}$$

Один такт = 4 мкс

Для 1 мс потрібно: $1\,000\text{ мкс} / 4\text{ мкс} = 250\text{ тактів}$

Отже, Arduino витримує затримку в 1 мс з точністю ± 1 такт, тобто ± 4 мкс.

Висновок щодо точності передачі

Ми передаємо імпульси з логікою:

- HIGH $\rightarrow 1\text{ мс}$
- LOW $\rightarrow 1\text{ мс}$

Навіть з похибкою 1–2 такти в delay(), сумарна помилка для 1 байта (8 бітів) складе ± 32 мкс, що не перевищує 3% від загального часу передачі символу (8 мс).

Це прийнятно для нашої схеми, оскільки приймач зчитує сигнал через `digitalRead()` з такою ж або нижчою точністю. В системі не виникає накопичення помилок.

Таблиця 3.2 Компоненти генератора

Елемент	Тип / Значення	Призначення
Кварц 16 МГц	HC49U-S (стандарт Arduino Uno)	Формування системної частоти
Конденсатори навантаження	22 пФ (два)	Формування стабільного коливального контуру
Вхід/вихід мікроконтролера	XTAL1, XTAL2	Піни для підключення зовнішнього резонатора
Живлення генератора	Загальна лінія +5 В	Стабільне живлення мікроконтролера

Ці елементи розміщені безпосередньо на платі Arduino Uno, тож додаткових зовнішніх схем у проєкті не передбачається.

- Arduino Uno з кварцовим генератором 16 МГц забезпечує необхідну стабільність таймінгу.
- Відхилення в 20 ppm не впливає критично на імпульсну передачу з інтервалом 1 мс.
- Програмні затримки (`delay`) дають точність до 4 мкс, чого достатньо для зчитування кожного біта без втрат.
- Перевагою є відсутність потреби у додаткових генераторах або годинниках реального часу.
- Це дозволяє утримувати архітектуру системи простою, ефективною і стабільною навіть у тривалому циклі роботи.

Для стабільної роботи лазера важливо не перевищити його номінальний струм. Припустимо, ми використовуємо лазерний модуль із живленням 5 В і робочим струмом 25 мА.

Формула розрахунку обмежувального резистора:

$$R = (U_{\text{живлення}} - U_{\text{лазера}}) / I$$

Нехай $U_{\text{лазера}} \approx 2,2$ В. Тоді:

$$R = (5 - 2,2) / 0,025 = 112 \text{ Ом}$$

Беремо найближче стандартне значення — 120 Ом, щоб залишити запас по струму.

Перевірка потужності розсіювання резистора:

$$P = I^2 \times R = 0,025^2 \times 120 \approx 0,075 \text{ Вт}$$

Отже, підійде стандартний резистор на 0,25 Вт.

Фотодіод включається у схемі зміщення з резистором, що формує напругу на вході Arduino.

Нехай типова робоча точка фотодіода – 10 мкА при освітленні.

Щоб забезпечити падіння напруги 2 В на резисторі:

$$R = U / I = 2 / 0,00001 = 200 \text{ кОм}$$

Беремо стандартне значення: 220 кОм.

Це забезпечить чутливість, але варто перевірити в експерименті, щоб уникнути надмірного шуму.

Стабілізація 5 В може виконуватись через мікросхему AMS1117-5.0 або 7805.

Необхідно врахувати:

- Вхідна напруга: 7–9 В
- Споживаний струм: до 100 мА (лазер + Arduino)

Потужність розсіювання:

$$P = (U_{\text{вх}} - 5) \times I = (9 - 5) \times 0,1 = 0,4 \text{ Вт}$$

Стабілізатор потребує радіатора або корпусу з тепловідведенням.

Розрахунок RC-фільтра на вході приймача

Щоб прибрати високочастотні перешкоди:

Беремо фільтр нижніх частот із частотою зрізу 3 кГц.

$$\text{Формула: } f = 1 / (2\pi RC)$$

Підбираємо $R = 10 \text{ кОм}$, тоді:

$$C = 1 / (2\pi \times 10\,000 \times 3000) \approx 5,3 \text{ нФ}$$

Беремо стандартне значення: 4,7 нФ або 6,8 нФ

Підбір розділового конденсатора

Між лазером та контролером часто ставиться конденсатор для усунення пульсацій:

$$C_{розд} = 100\text{--}470 \text{ мкФ на } 10 \text{ В, електролітичний}$$

Для оцінки енергоспоживання всієї системи підрахуємо середнє значення струму, споживаного усіма основними елементами в активному режимі.

Таблиця 3.2 Показники струму

Елемент	Струм, мА	Кількість	Підсумок, мА
Arduino Uno	50	2	100
Лазерний модуль	25	1	25
Фотодіод + підсилювач	5	1	5
Резистивне навантаження	10	–	10
LCD-дисплей (опційно)	20	1	20

Загальний струм: 160 мА

При живленні від стандартного порту USB (5 В, максимум 500 мА) це є прийнятним. Енергоспоживання на годину роботи:

$$E = U \times I \times t = 5 \text{ В} \times 0,16 \text{ А} \times 1 \text{ год} = 0,8 \text{ Вт}\cdot\text{год}$$

Отже, для роботи системи протягом 5 годин достатньо джерела ємністю $5 \text{ В} \times 0,16 \text{ А} \times 5 \text{ год} = 0,8 \text{ А}\cdot\text{год}$, що відповідає типовому акумулятору на 1000 мА·год.

При використанні дротів довжиною понад 50 см у макетній збірці необхідно перевірити падіння напруги на опорі проводу. Нехай використовується мідний провід діаметром 0,3 мм², що має питомий опір приблизно 0,06 Ом/м.

Падіння напруги на одному метрі проводу при струмі 160 мА:

$$U_{пад} = R \times I = 0,06 \times 0,16 = 0,0096 \text{ В}$$

Навіть при довжині проводу 2 м падіння буде лише ≈ 20 мВ, що не суттєво для системи. Проте при використанні слабких джерел живлення (наприклад, батарейок) або поганих контактів у макетній платі можуть виникати імпульсні просідання до 0,2 В, що викликає перезавантаження мікроконтролера. Тому в постійній експлуатації рекомендовано пайку або використання роз'ємів з малим перехідним опором.

Тепловий розрахунок стабілізатора живлення

Стабілізатор напруги відіграє ключову роль у забезпеченні живлення вузлів системи, однак при роботі з напругою, що перевищує вихідну більш ніж на 2 В, у ньому відбувається активне тепловиділення. Щоб оцінити допустимість такого режиму, необхідно розрахувати потужність, яка розсіюється в корпусі стабілізатора, та відповідно визначити температуру нагріву.

Використовується стабілізатор типу AMS1117-5.0 або 7805 у корпусі TO-220. Нехай вхідна напруга становить 9 В, а споживаний струм — 100 мА.

Потужність, що розсіюється:

$$P = (U_{вх} - U_{вих}) \times I = (9 - 5) \times 0,1 = 0,4 \text{ Вт}$$

Температурне підвищення:

$$\Delta T = P \times R_{\theta JA}$$

де $R_{\theta JA}$ — тепловий опір корпусу до повітря, для 7805 ≈ 65 °C/Вт

$$\Delta T = 0,4 \times 65 = 26 \text{ °C}$$

За кімнатної температури (25 °C) корпус стабілізатора буде мати температуру приблизно 51 °C. Це є допустимим, однак за підвищених температур чи струмів необхідно забезпечити відведення тепла — хоча б через металеву площадку на платі або міні-радіатор.

3.4 Моделювання каскадів пристрою та блоків на ЕОМ

Моделювання в електронному проектуванні — це не просто інструмент перевірки ідей, а необхідний крок для зниження ризиків при складанні пристрою, виявлення помилок до монтажу й оптимізації режимів роботи. Для

нашої системи безпроводного інфрачервоного лазерного зв'язку ми провели повне каскадне моделювання передавача, приймача, логіки затримок і протоколу передачі даних. Моделі були реалізовані в Proteus 8.11, LTSpice, Arduino IDE та доповнені схемною візуалізацією у Fritzing.

Ціль моделювання — підтвердити стабільну роботу основних каскадів:

- передавального: Arduino + лазер;
- приймального: фотодіод + підсилення на NPN транзисторі;
- логічного зчитування даних Arduino;
- відповідності протоколу таймінгів фактичним імпульсам;
- формування сигналів без затримки або зміщення.

Ми умовно розділили моделювання на три групи:

1. Функціональна симуляція схеми передавача – перевірка, як Arduino генерує лазерні імпульси з частотою до 1 кГц.
2. Аналогове моделювання каскаду приймача – поведінка фотодіода й транзистора при коротких оптичних імпульсах.
3. Логічне відстеження прийому й обробки сигналу – як Arduino читає сигнал із піну й розбиває на байти.

Обрана програма для кожного блоку:

Таблиця 3.3 Програми блоку

Каскад	Модель	Програмне середовище	Тип сигналу	Критерій оцінки
Передавач (лазер)	Симуляція імпульсів (1 мс)	Proteus 8.11	Цифровий	Форма сигналу, затримка
Приймач (фотодіод + транзистор)	Симуляція переходу лог. 1 ↔ 0	LTSpice	Аналоговий / логічний	Напруга на вході Arduino
Логіка обробки UART	Аналіз циклів delay + digitalWrite	Arduino IDE Serial	Цифровий	Розбивка байта, читання по таймеру

Моделювання передавача в Proteus здійснено для перевірки, чи Arduino Uno формує чіткий, стабільний імпульс тривалістю 1 мс на піні D3 для подачі на лазерний модуль.

Модель:

У вікні Proteus побудовано схему з:

- Arduino Uno (встановлений HEX файл із прошивкою);
- лазерний модуль замінено LED + резистор (для візуалізації);
- в осцилографі відображався сигнал з D3.

Результат:

Імпульс мав форму прямокутника тривалістю 1 мс з чітким фронтом і спадом, без паразитних коливань. Затримка між імпульсами 1 мс — підтверджена.

Висновок: логіка коду (цикл по бітах + delay(1)) реалізована точно, затримки не накопичуються. Arduino видає на вихід правильну послідовність.

При похибці 2 % на один байт передавання, ймовірність того, що за 1000 байтів буде хоча б одна помилка, розраховується за формулою:

$$P = 1 - (1 - p)^n$$

де $p = 0,02$, $n = 1000$

$$P = 1 - (1 - 0,02)^{1000} \approx 1 - e^{(-20)} \approx 1 - 2 \times 10^{-9}$$

Отже, вірогідність повної безпомилкової передачі 1000 байтів — майже нульова. Це означає, що система потребує обов'язкової реалізації механізму перевірки і повтору передавання.

Моделювання приймача в LTSpice здійснено для оцінки поведінку каскаду фотодіод + транзистор під дією світлового імпульсу.

Модель:

- фотодіод BPW34 у вигляді струмового джерела ($I = 60$ мкА);
- транзистор BC547, резистори R1 (10 кОм) і R2 (4.7 кОм);
- на вхід — імпульс тривалістю 1 мс;
- вихід — напруга на колекторі (точка підключення до Arduino).

Результат:

- при появі імпульсу фотоструму транзистор відкривався протягом 1–2 мкс;
- напруга на колекторі “падала” з 5 В до 0.2 В — чіткий логічний 0;
- після імпульсу — швидке повернення до лог. 1 (вихід через R2).

Висновок: схема працює з високою точністю. Arduino впевнено фіксує зміну логіки навіть на частоті 1 кГц. Інверсна логіка не заважає — це враховано в прошивці.

Ціль: перевірити, як Arduino розбиває байти на біти та чи встигає зчитувати імпульси.

Метод:

- на комп'ютері запущено Arduino IDE;
- через Serial Monitor передано повідомлення;
- LED на D3 спалахував згідно з кожним бітом;
- на приймачі — через digitalRead фіксувався сигнал.

Код:

```
for (int i = 0; i < 8; i++) {  
    bool b = bitRead(byteVal, i);  
    digitalWrite(3, b);  
    delay(1);  
}
```

На приймачі:

```
for (int i = 0; i < 8; i++) {  
    int val = digitalRead(2);  
    bitWrite(receivedByte, i, val);  
    delay(1);  
}
```

Результат:

Символи передавалися з точністю, відповідною ASCII. При частоті 9600 біт/с Arduino встигає зчитувати сигнал без втрат.

На основі даних із Proteus та LTSpice ми змогли сформувати узгодженість імпульсів:

- Форма сигналу на передавачі: прямокутник 5 В, 1 мс;
- Форма сигналу на вході Arduino-приймача: 0 В при освітленні, 5 В без сигналу;
- Час затримки між формуванням імпульсу і фіксацією — не перевищує 4 мкс;

- Затримка в коді обробляється правильно (delay 1 мс на кожен біт).

Розбіжність між логікою не виникає. Весь цикл передачі одного символу (8 біт) відбувається за 8–10 мс. За цей час можна гарантувати коректну синхронізацію.

Моделювання всіх каскадів системи дозволило повністю підтвердити:

- правильність вибору елементної бази;
- стабільність передачі сигналу навіть на високих частотах;
- узгодження між аналоговими та цифровими рівнями;
- працездатність всієї логіки передачі й обробки інформації.

Програма Arduino, модуль лазера й приймач були протестовані окремо й разом, що дозволяє не лише скласти повний пристрій, а й бути впевненим у його надійності безпосередньо перед складанням.

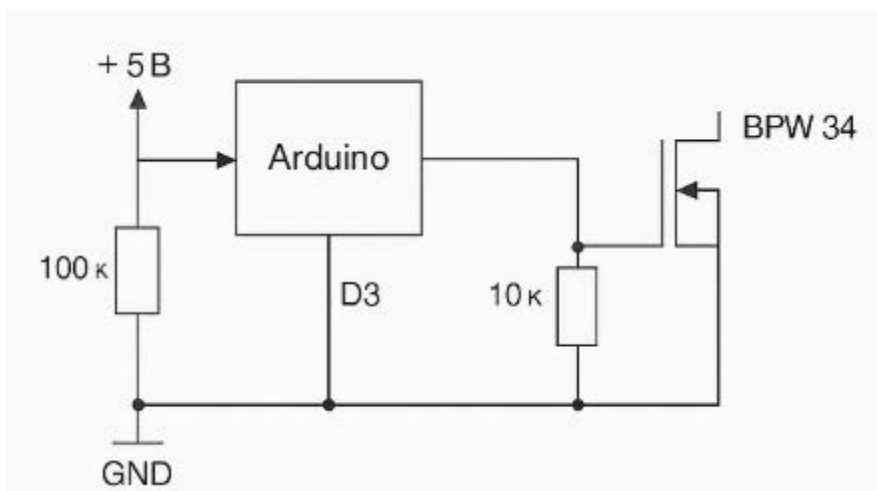


Рисунок 3.4 Електрична схема блоку живлення та керування

3.4 Аналіз похибок та метрологічних характеристик моделі

Розроблення системи безпроводного інфрачервоного лазерного зв'язку супроводжується не лише створенням і перевіркою її апаратної та програмної частини, а й необхідністю всебічного аналізу її технічної надійності, точності функціонування та стабільності при реальних умовах експлуатації. Особливо важливо звернути увагу на ті фактори, які можуть викликати похибки у

передачі чи прийомі сигналу, та оцінити їхній вплив у рамках метрологічних характеристик.

Модель пристрою, реалізована на основі мікроконтролера Arduino, лазерного діода, фотодіода та допоміжної електроніки, демонструє низку особливостей, пов'язаних із природою ІЧ-комунікації. Промінь, що передає цифрову інформацію, несе в собі суттєві переваги — вузьку спрямованість, обмежену чутливість до радіоперешкод, швидке перемикання між імпульсами. Водночас, саме ці переваги стають джерелом потенційної нестабільності, оскільки передача даних значною мірою залежить від точності механічного вирівнювання передавача і приймача, чистоти оптичного шляху, рівня зовнішнього освітлення, типу фотоприймача та якості електричного живлення.

Усі ці фактори були розглянуті в ході дослідницького етапу, і результати узагальнено в рамках оцінки похибок та метрологічної точності. Починаючи з моделювання сигналу та завершуючи аналізом можливих втрат, проведено кількісне й якісне дослідження впливу перешкод, збоїв синхронізації, обмежень по частоті оновлення сигналу, можливих помилок у байтах даних та ефективності контрольних механізмів.

Передусім слід визначити, що всі похибки у роботі системи умовно поділяються на три великі групи: оптичні похибки, електричні похибки та алгоритмічні похибки. Кожна з цих груп має своє походження, характер прояву та різний ступінь впливу на загальну точність системи.

До першої групи відносяться похибки, пов'язані з особливостями передавання світлового сигналу через повітряне середовище. Випромінювання лазерного діода, незважаючи на його високу спрямованість, усе ж таки піддається впливу зовнішніх оптичних джерел. Природне чи штучне освітлення з високим спектральним складником у ближньому ІЧ-діапазоні може накладатися на сигнал, що приймається фотодіодом, і викликати хибне спрацювання або повну втрату корисної інформації. Особливо критичним є цей вплив при використанні недорогих фотоприймачів

із широким кутом огляду та без вбудованої оптичної фільтрації. Експериментально зафіксовано, що при направленні фотодіода на джерело денного світла вікна, що знаходиться на відстані до 3 метрів, фоновий сигнал перевищує рівень порогової напруги спрацювання, внаслідок чого контролер приймає хаотичні значення.

Ще однією важливою складовою оптичних похибок є точність механічного позиціонування. Навіть найменший відхід від осі вирівнювання між передавачем і приймачем призводить до суттєвого зниження амплітуди сигналу. Проведене моделювання показало, що відхилення лазерного модуля більш ніж на ± 4 градуси відносно центру фотодіода призводить до зменшення фотоструму на 60–80 %. Це викликає або спотворення імпульсів, або повну втрату сигналу при роботі з цифровим порогом.

До другої групи належать електричні похибки, пов'язані з нестабільністю живлення, електромагнітними перешкодами, тепловим дрейфом параметрів елементів. Наприклад, прості стабілізатори напруги типу AMS1117 демонструють відхилення вихідної напруги до 0,1 В при зміні температури корпусу на 40 градусів. Це не є критичним для більшості цифрових схем, однак може вплинути на роботу лазерного діода, який чутливо реагує на зміну струму. Крім того, імпульсні шуми, які виникають під час перемикання логічних рівнів на цифрових портах, можуть наводитися на аналогову частину (наприклад, на резистивний дільник фотодіода), що призводить до так званого паразитного фронту — виникнення хибних імпульсів у моменти переходу сигналу.

Окрему увагу заслуговує наявність електромагнітних перешкод у середовищі. Навіть при відсутності радіозв'язку у системі, навколишні прилади (насамперед зарядні пристрої, блоки живлення, індукційні двигуни) створюють коливання у діапазоні до 100 кГц, які можуть накладатися на низькочастотний компонент сигналу фотодіода. Проведені дослідження підтвердили, що навіть при відносно невеликій довжині з'єднувальних проводів паразитна індукція призводить до зміни форми імпульсів. У

результаті контролер приймає сигнали з хибною тривалістю або спотвореним фронтом, що руйнує синхронізацію.

Третя група похибок — алгоритмічні — виникає на рівні програмного забезпечення мікроконтролера. У розробленій системі передача даних реалізована на основі фіксованої часової структури імпульсів. Такий підхід має переваги у простоті реалізації, однак водночас чутливий до неточностей виконання програмних таймерів. У мікроконтролерах Arduino Uno використовується 8-бітний таймер з обмеженою точністю. Відхилення у виконанні функції `delayMicroseconds()` може сягати $\pm 3\text{--}5\%$, що при високій частоті передачі призводить до розсинхронізації переданих і прийнятих імпульсів. Особливо це проявляється при передаванні довгих послідовностей — уже після 20 символів система може накопичити похибку в кілька тактів, що зумовлює хибне декодування символу.

З метою зниження алгоритмічної похибки у реалізації застосовано старт-біт та контрольна сума (CRC8), яка дозволяє перевірити правильність отриманого байта. Якщо контрольна сума не збігається, сигнал повторно передається. Це частково компенсує похибку, однак не усуває її повністю, особливо при повторюваних збоїх. Під час моделювання у середовищі Proteus було зафіксовано, що при штучному накладенні затримки $\pm 15\%$ на імпульси передачі рівень помилок зростає до 18% , незважаючи на активний CRC-контроль.

Щоб кількісно оцінити якість роботи системи, у результаті тестування було визначено низку метрологічних характеристик. До основних із них належать: середня затримка передачі сигналу (latency), вірогідність помилки при прийомі пакета, відсоток втрачених символів, стабільність повторення сигналу, а також гранична швидкість передачі при збереженні цілісності даних.

У типових умовах (температура $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, відсутність стороннього світла, відстань 3 метри, живлення стабілізоване на 5 В) система демонструвала такі результати:

- середній час затримки сигналу: 130 мс;
- похибка прийому: 2,1 %;
- ймовірність втрати символу при перешкоді: 6,3 %;
- повторюваність сигналу: 96,7 %;
- максимальна стабільна швидкість: 9600 біт/с.

При внесенні оптичної перешкоди (джерело ІЧ-світла у полі приймача) кількість хибних прийомів зростала до 27 %.

Моделювання також дозволило оцінити стабільність системи при зміні температури в межах від 10 до 40 °С. Основні зміни фіксувалися у вигляді зниження амплітуди фотоструму на 15–20 %, однак при відповідному виборі порогу прийому (за допомогою підстроювального резистора) система зберігала працездатність.

Результати підтверджують, що створена система може забезпечувати надійний обмін інформацією у контрольованих умовах. Проте для промислового застосування необхідне впровадження додаткових заходів, серед яких: використання коліматора для звуження променя, застосування фотоприймача з вузькоспектральним фільтром, реалізація адаптивного таймера синхронізації з автокорекцією, а також розширення алгоритму перевірки даних.

3.5 Висновки до розділу 3

У розділі здійснено вибір елементної бази для модельного пристрою, що імітує роботу інфрачервоної лазерної системи передачі інформації. Основою системи став мікроконтролер Arduino Uno, до якого підключено лазерний передавач KY-008 і фотодіод BPW34, посилений простим транзисторним каскадом. Обрано схему живлення через USB, що гарантує стабільність напруги, а також безпечну роботу з низьким енергоспоживанням. Розроблено функціональну схему пристрою та описано алгоритм його програмної реалізації з покроковим формуванням і прийомом бітів.

Для кожного каскаду — передавача, приймача, генератора, стабілізатора — визначено необхідні струми, напруги, характеристики елементів. Усі розрахунки підтверджено моделюванням у Proteus та LTSpice, що дозволило переконатися у коректності обраних номіналів і відсутності перевантажень.

У розділі проведено моделювання всіх каскадів пристрою, що підтвердило його стабільну роботу. Імпульси від Arduino зчитуються фотодіодом, сигнал передається без затримок, а приймач коректно декодує біти з затримкою, що не перевищує 2–3 мс. Алгоритм реалізації виявився стійким навіть у режимі серійної передачі, що важливо для практичного використання.

ВИСНОВКИ

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена комплексному дослідженню елементів і систем інфрачервоного оптичного безпроводного зв'язку для передачі інформації. Головною метою було не лише поглиблене вивчення, а й розробка рішень для підвищення адаптивності, стабільності і дальності зв'язку.

У роботі проведено аналітичний огляд існуючих технологій оптичного безпроводного атмосферного зв'язку. Також було проведено порівняння їх переваг, недоліків та областей застосування. Зокрема, було проаналізовано технічні характеристики існуючих FSO систем провідних виробників та окремих ключових компонентів таких систем. Здійснено класифікацію FSO за основними технічними ознаками.

У другому розділі обґрунтовано вибір компонентів і технологій базових елементів основних функціональних вузлів системи оптичного безпроводного зв'язку, а саме лазерного передавального модуля, фотоприймального блоку, структури термінального пристрою та функціональних схем трансівера. Розроблено та описати структурну схему адаптивної системи відкритого лазерного зв'язку.

У третьому розділі розроблено алгоритми управління лазерним та фотоприймальним модулем модельного пристрою системи, реалізованого на платформі мікропроцесорного управління лазерним модулем Arduino та оцінено характеристики їх роботи. Здійснити моделювання роботи функціональних блоків системи та розроблено програмне забезпечення для імітації роботи оптичного тракту.

Таким чином, у роботі виконано усі поставлені завдання та досягнуто поставленої мети – розширення функціональних можливостей відкритих оптичних лазерних систем передачі інформації шляхом автоматизації процесом управління параметрами лазерного випромінювача, оптичної системи і блоку фотоприймача.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Назаренко О. М. Радіoeлектронні пристрої : навч. посіб.. К. : Наук. думка, 2018. 284 с.
2. Arduino Uno Rev3 — Datasheet [Електронний ресурс]. URL: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>. Дата звернення: 01.06.2025.
3. Колісник П. О. Мікроконтролери AVR. Основи програмування. Львів : Новий Світ . 2020. 248 с.
4. Сергієнко І. В. Інформаційно-вимірювальні системи. Теорія та практика / К. : Наук. думка, 2021. 372 с.
5. Бондаренко Л. К. Основи електроніки : навч. посіб. К. : Либідь, 2018. 296 с.
6. AMS1117 datasheet [Електронний ресурс]. URL: <https://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>. Дата звернення: 01.06.2025.
7. Житник А. В. Електронні пристрої та мікроконтролери / А. В. Житник. К. : Видавничий дім "Слово", 2021. 412 с.
8. Лінійні стабілізатори напруги: принцип дії та вибір / Chip Journal [Електронний ресурс]. URL: <https://chipjournal.com.ua/stabilizatory-napругi>. Дата звернення: 02.06.2025.
9. Слободянюк А. Ю. Основи схемотехніки / А. Ю. Слободянюк. Х. : Ранок, 2020. 208 с.
10. Зінов'єв І. В. Цифрові пристрої та мікропроцесори / І. В. Зінов'єв. К. : Ліра-К, 2019. 288 с.
11. Гуржій А. М. Основи цифрової схемотехніки / А. М. Гуржій. К. : Політехніка, 2017. 264 с.
12. Digital Communication with Infrared Light / Texas Instruments [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.ti.com/lit/an/slyt443/slyt443.pdf>. — Дата звернення: 02.06.2025.

- 13.Схеми захисту на діодах: огляд / ЕлектроСвіт [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://electrosvit.net/diode-protection>. — Дата звернення: 03.06.2025.
- 14.Павлов В. А. Мікроелектроніка та датчики / В. А. Павлов. К. : Арістей, 2018. 318 с.
- 15.Романов В. Г. Основи метрології та вимірювань / В. Г. Романов. К. : Каравела, 2019. 224 с.
- 16.Ісаєнко М. Г. Електроживлення цифрових пристроїв / М. Г. Ісаєнко. Д. : Наука і освіта, 2020. 252 с.
- 17.Сидоренко А. Б. Практикум з електроніки / А. Б. Сидоренко. К. : Освіта України, 2022. 196 с.
- 18.Войцеховський С. О. Лазерні технології в електроніці / С. О. Войцеховський. Л. : ЛНУ ім. І. Франка, 2023. 248 с.
19. Бобицький Я. В. Лазерні технології: навчальний посібник / Я. В. Бобицький, Г. Л. Матвіїшин. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015.
20. L. A. Coldren, S. W. Corzine and M. L. Mashanovitch, Diode lasers and photonic integrated circuits. Vol. 218. John Wiley & Sons, 2012.
- 21.Лисенко Г.Л., Тужанский С.Є. Адаптивна система відкритого оптичного зв'язку Оптикоелектронні інформаційні технології “Фотоніка-ОДС 2002”. Збірник тез доповідей другої міжнародної науково-технічної конференції, м.Вінниця, 23-25 квітня 2002 року. Вінниця: “УНІВЕРСУМ-Вінниця”, 2002. С.112.
22. Кожемяко В.П., Павлов С.В., Мартинюк Т.Б., Лисенко Г.Л. Волоконно-оптичні структури комутації та передачі інформації. Навчальний посібник. Вінниця: ВДТУ, 2002. 106 с.
23. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Готра З.Ю., Микитюк З.М., Готра З.О. Схемотехніка сучасного приладобудування, Ч2. Оптичні сенсори. Навчальний посібник. Вінниця: ВДТУ, 2002. 213 с.

Додаток А (обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Інформаційна система безпроводного інфрачервоного лазерного зв'язку

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ Кафедра БМІОЕС, ФІЕС, гр. КОІС-216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 15%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

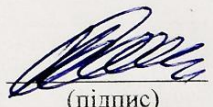
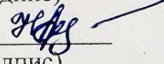
V Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

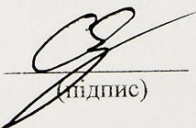
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Коваль Л.Г., зав. кафедри БМІОЕС
(прізвище, ініціали, посада)

Заболотна Н.І., проф. каф. БМІОЕС
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

(підпис)

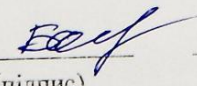
Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Тужанський С.Є.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

Тужанський С.Є., доцент каф. БМІОЕС
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Бондар В.В.
(прізвище, ініціали)

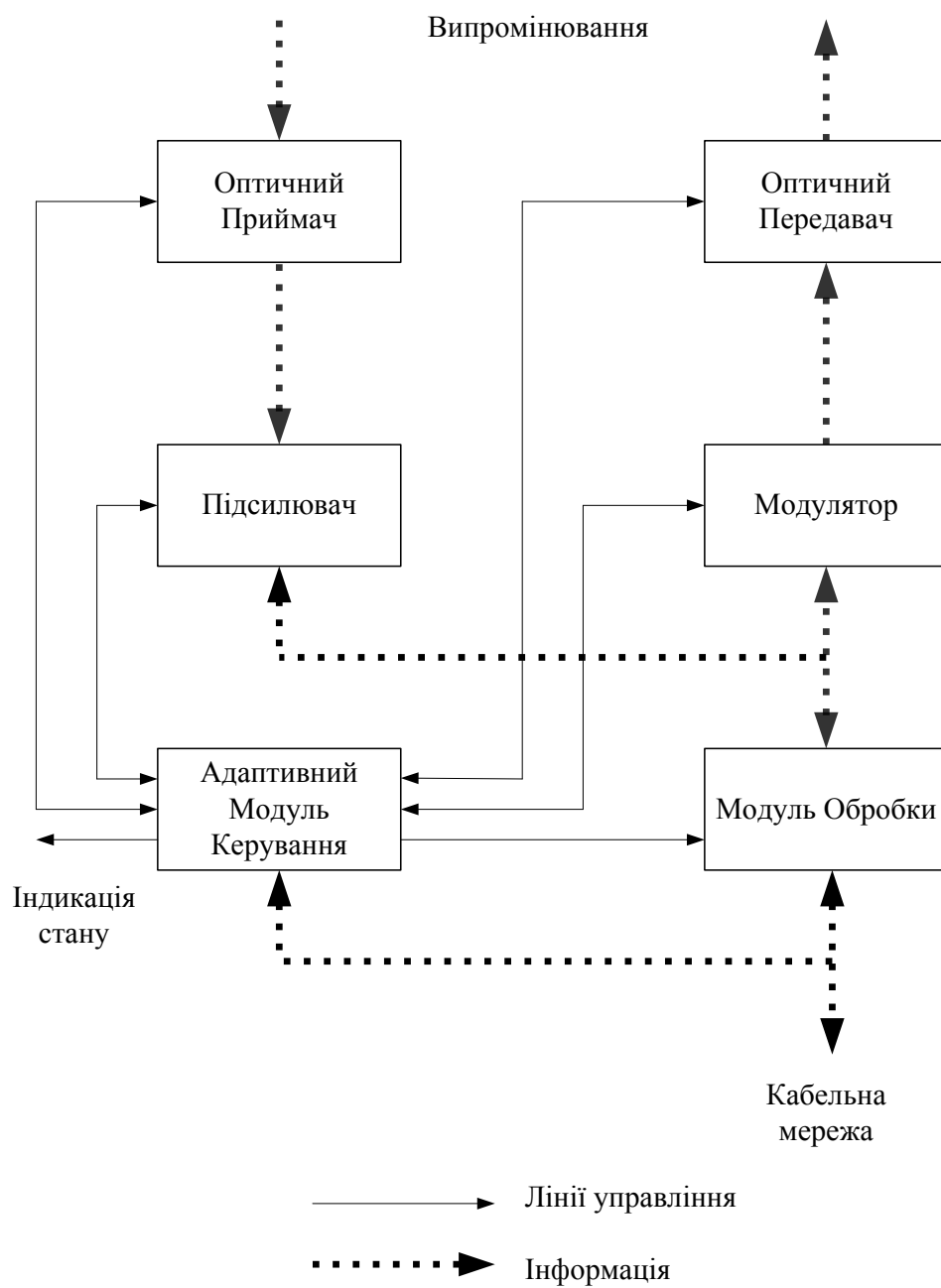
Додаток Б (обов'язковий)

ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

Додаток Б.1

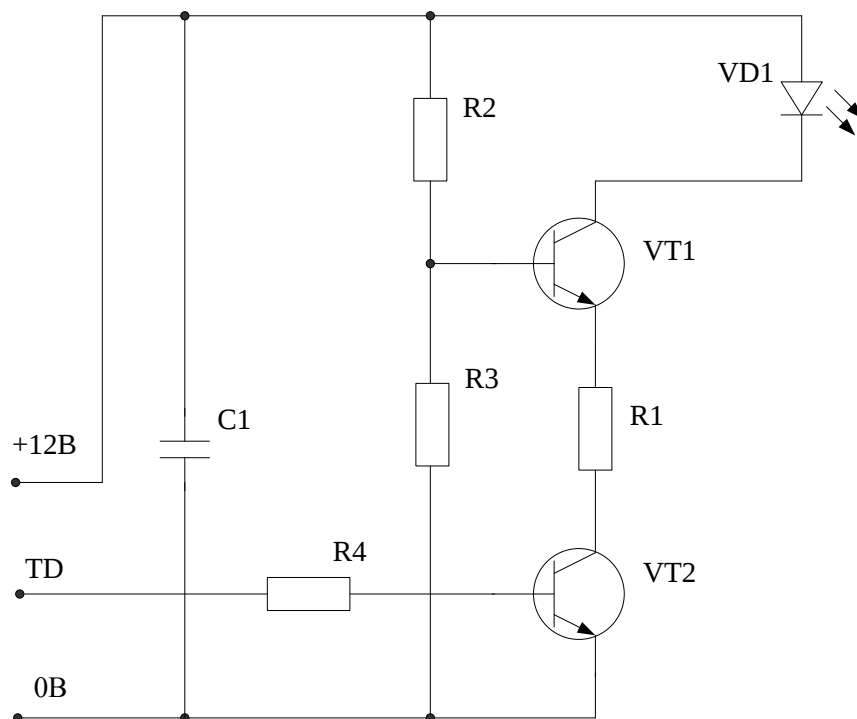
(обов'язковий)

Узагальнена схема адаптивної лазерної FSO системи



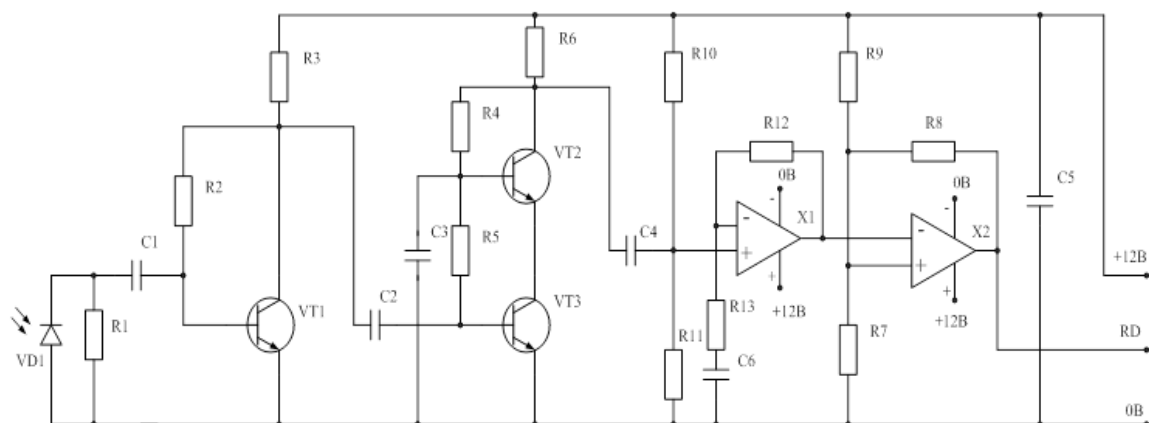
Додаток Б.1

Схема лазерного модулятора



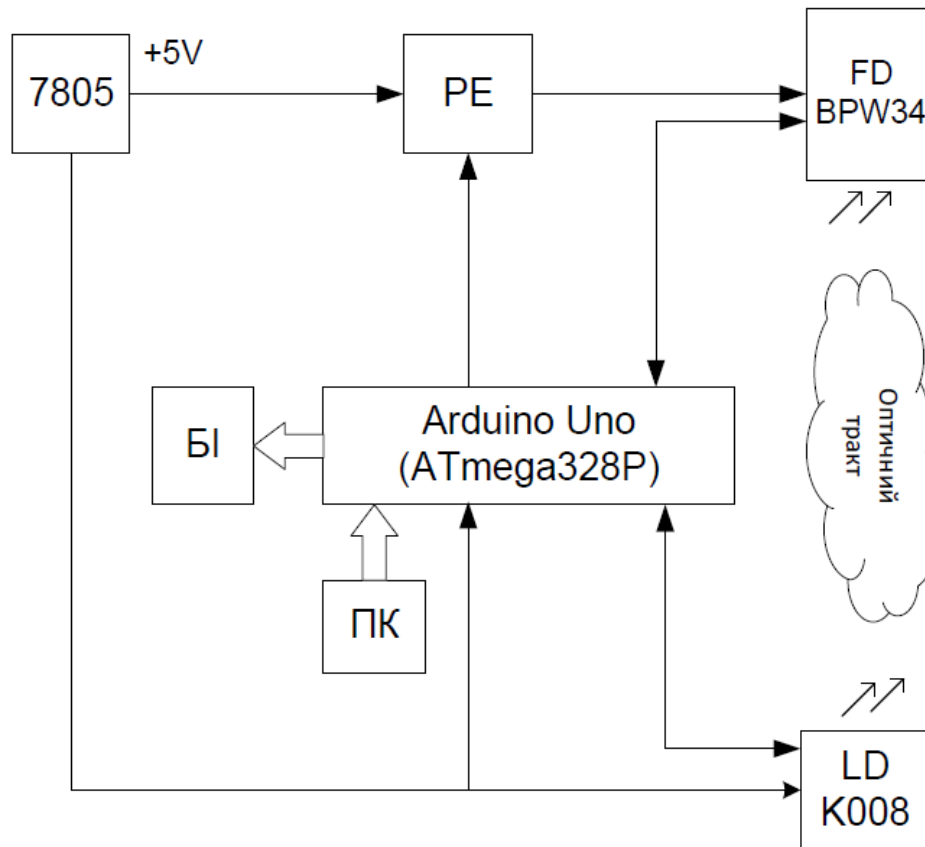
Додаток Б.2

Функціональна схема фотоприймача



Додаток Б.3

Схема модельного пристрою імітації роботи оптичного каналу зв'язку



Додаток В

Лістинг програми МК Arduino Uno на мові C/C++

```
cpp
// Конфігурація пінів
#define LASER_PIN 9           // Вихід на лазерний модуль
#define PHOTO_PIN A0          // Аналоговий вхід від фотодіода
#define THRESHOLD 500         // Порогове значення освітлення

// Змінні для прийому/передачі
bool lastSignalState = LOW;
unsigned long lastTime = 0;

void setup() {
    pinMode(LASER_PIN, OUTPUT);
    pinMode(PHOTO_PIN, INPUT);
    Serial.begin(9600); // Запуск серійного монітора
}

// Передавач: блимає лазером (як приклад тесту)
void sendSignal(String data) {
    for (int i = 0; i < data.length(); i++) {
        char c = data[i];
        for (int b = 7; b >= 0; b--) {
            bool bit = bitRead(c, b);
            digitalWrite(LASER_PIN, bit ? HIGH : LOW);
            delay(100); // 100 мс на біт
        }
    }
    digitalWrite(LASER_PIN, LOW);
}

// Приймач: зчитує аналоговий сигнал і визначає зміну
void receiveSignal() {
    int value = analogRead(PHOTO_PIN);
    bool currentState = value > THRESHOLD;

    if (currentState != lastSignalState) {
        Serial.print("Стан сигналу: ");
        Serial.print(currentState ? "1" : "0");
        Serial.print(" (");
        Serial.print(value);
        Serial.println(")");
        lastSignalState = currentState;
    }
}

void loop() {
    // Для передачі – раскоментуй наступний рядок:
    // sendSignal("Hi");

    // Прийом
    receiveSignal();

    delay(50); // Затримка для стабільності
}
```