

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**  
**ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ**  
Кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем

«На правах рукопису»

Завідувач кафедри доктор фіз.-мат. наук, професор

**Ігор АНІСІМОВ** \_\_\_\_\_

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА**

на тему:

**ЦИФРОВИЙ ОПТИЧНИЙ КАНАЛ ПЕРЕДАЧІ ВІД ДЖЕРЕЛА**  
**АНАЛОГОВОГО СИГНАЛУ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА**  
**ARDUINO**

**Виконав :**

студент 4-го курсу денної форми навчання

спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка

ОПП «Інформаційна безпека телекомунікаційних систем і мереж»

**Федорченко Іван Олександрович** \_\_\_\_\_

**Науковий керівник:**

кандидат фізико-математичних наук, асистент

кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем

**Богданов Роман Вікторович** \_\_\_\_\_

**Рецензент:**

кандидат фізико-математичних наук, доцент

кафедри комп'ютерної інженерії

**Олександр БАУЖА** \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій бакалаврській роботі

немає запозичень з праць інших авторів без

відповідних посилань

студент **Федорченко Іван** \_\_\_\_\_

**Київ – 2025**

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 34 с., 1 табл., 13 рис., 4 графіка, 1 дод., 9 джерел.

**Об'єкт дослідження** – цифровий оптичний канал передачі даних.

**Предмет дослідження** – процес передачі аналогового сигналу у цифрову форму через оптичний канал на базі Arduino.

**Мета роботи** – розробка цифрового оптичного каналу бази мікроконтролерних наборів Arduino Nano для передачі даних з джерела аналогового сигналу, реалізація його апаратної та програмної частин і проведення експериментальної перевірки функціональності.

**Методи дослідження** – аналіз науково-технічної літератури, макетування, мікроконтролерне програмування, експериментальна перевірка та обробка отриманих даних.

У **дипломній роботі** розглянуто побудову простого цифрового оптичного каналу передачі інформації, що реалізований на базі мікроконтролерів **Arduino Uno**. У системі використано **фоторезистор** як джерело аналогового сигналу, який зчитується за допомогою вбудованого **10-бітного АЦП Arduino Uno**. Оцифровані дані передаються у вигляді **світлових імпульсів** через оптичний канал.

Приймальна частина реалізована також на Arduino Uno і включає **датчик освітленості DAT194**, який реєструє світлові імпульси, перетворює їх в аналоговий сигнал, що потім знову оцифровується АЦП. Відновлений цифровий код виводиться на **LCD-дисплей 16×2** для подальшої візуалізації результатів.

У роботі наведено **принципову схему, блок-схему алгоритму роботи системи**, описано **апаратну реалізацію на макетній платі**, представлено **фрагменти програмного коду** для передавача і приймача, а також **експериментальні результати**, які підтверджують коректність роботи та надійність передачі цифрових даних через оптичний канал.

**Основні результати.** У процесі виконання роботи було реалізовано функціональний макет цифрового оптичного каналу передачі інформації, що

побудований на двох мікроконтролерах Arduino Uno. Система дозволяє передавати 8-бітний цифровий код, сформований на основі аналогового сигналу від фоторезистора, який зчитується за допомогою вбудованого 10-бітного АЦП Arduino.

Передача даних здійснюється за допомогою світлодіодного випромінювача, який формує оптичні імпульси відповідно до переданого цифрового коду. На приймальній стороні датчик освітленості DAT194 фіксує ці імпульси, після чого сигнал знову проходить аналого-цифрове перетворення та декодується. Для виведення результатів використано два LCD-дисплеї 16×2, які відображають значення, отримані на передавальній і приймальній стороні. Проведені експерименти засвідчили стабільність роботи оптичного каналу, точність оцифрування аналогових сигналів, а також надійність передачі даних між модулями за допомогою світлового зв'язку. Макет повністю функціонує в реальному часі та демонструє можливість практичного застосування подібної технології в системах збору даних або бездротового оптичного зв'язку.

**Ключові слова:** Arduino Uno, оптичний канал, світлодіод, датчик освітленості, цифрова передача, аналого-цифрове перетворення, LCD-дисплей, мікроконтролер.

## ЗМІСТ

Вступ .....	5
1.Проектування цифрового оптичного каналу передачі .....	6
1.1. Джерело аналогового сигналу та його параметри .....	6
1.2. Параметри аналогово-цифрового перетворення .....	7
1.3. Компоненти оптоволоконної системи .....	7
1.4. Налаштування передачі оптичним волокном – вибір передавача .....	9
1.5. Технічні характеристики та сумісність .....	9
1.6. Оптимізація ефективності та енергоспоживання .....	10
1.7. Вибір оптичного кабелю .....	11
2. Реалізація цифрового оптичного каналу передачі .....	12
2.1. Принципова схема передавача та пояснення роботи .....	12
2.2. Шляхи потрапляння інформації з АЦП у мікроконтролер плати Arduino, продуктивність передачі інформації з порту вводу-виводу у послідовному режимі.....	13
2.3. Принцип дії оптичних каналів передачі .....	14
2.4. Компоненти системи для передачі логічних рівнів TTL .....	16
2.5. Алгоритм роботи та блок-схема .....	17
2.6. Протоколи однонаправленої передачі даних через Arduino .....	19
2.7. Програмна реалізація .....	23
2.7.1. Модуль передавача .....	23
2.7.2. Модуль приймача .....	24
2.7.3. Узгодження програмної та апаратної частин .....	21
2.8. Експериментальні результати .....	24
2.8.1. Оцінка кінцевої оптичної потужності .....	27
2.8.2. Експериментальні дослідження .....	27
2.9. Перспективи вдосконалення .....	31
Висновки .....	33
Перелік джерел посилання .....	34
Додаток А Лістинг програми для Arduino .....	35

## ВСТУП

Актуальність теми дослідження обумовлена потребою у передаванні даних з аналогових джерел у цифрову форму з використанням простих і доступних платформ. Одним із перспективних варіантів є використання оптичного каналу передачі даних, побудованого на базі Arduino Uno.

Метою роботи є розробка цифрового оптичного каналу передачі даних від джерела аналогового сигналу на базі Arduino Uno та дослідження його роботи.

Основні завдання:

1. Провести огляд літератури за темою.
2. Розробити принципову схему системи.
3. Реалізувати програмне забезпечення для прийому і передачі сигналу.
4. Провести експериментальне дослідження.
5. Проаналізувати результати та визначити перспективи вдосконалення.

Об'єкт дослідження – цифровий оптичний канал передачі даних.

Предмет дослідження – процес передачі аналогового сигналу у цифрову форму через оптичний канал на базі Arduino.

Методи дослідження – аналіз літературних джерел, моделювання, розробка та дослідження роботи прототипу.

# 1. ПРОЕКТУВАННЯ ЦИФРОВОГО ОПТИЧНОГО КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ

## 1.1 Джерело аналогового сигналу та його параметри

На представленому макеті реалізовано прототип цифрового оптичного каналу передачі даних із використанням двох мікроконтролерів Arduino Uno, LCD-дисплеїв, датчика освітленості (фоторезистор), а також потенціометра як джерела аналогового сигналу. Вся система змонтована на макетній платі з живленням через USB-кабелі представлена на рисунку 1.1 .

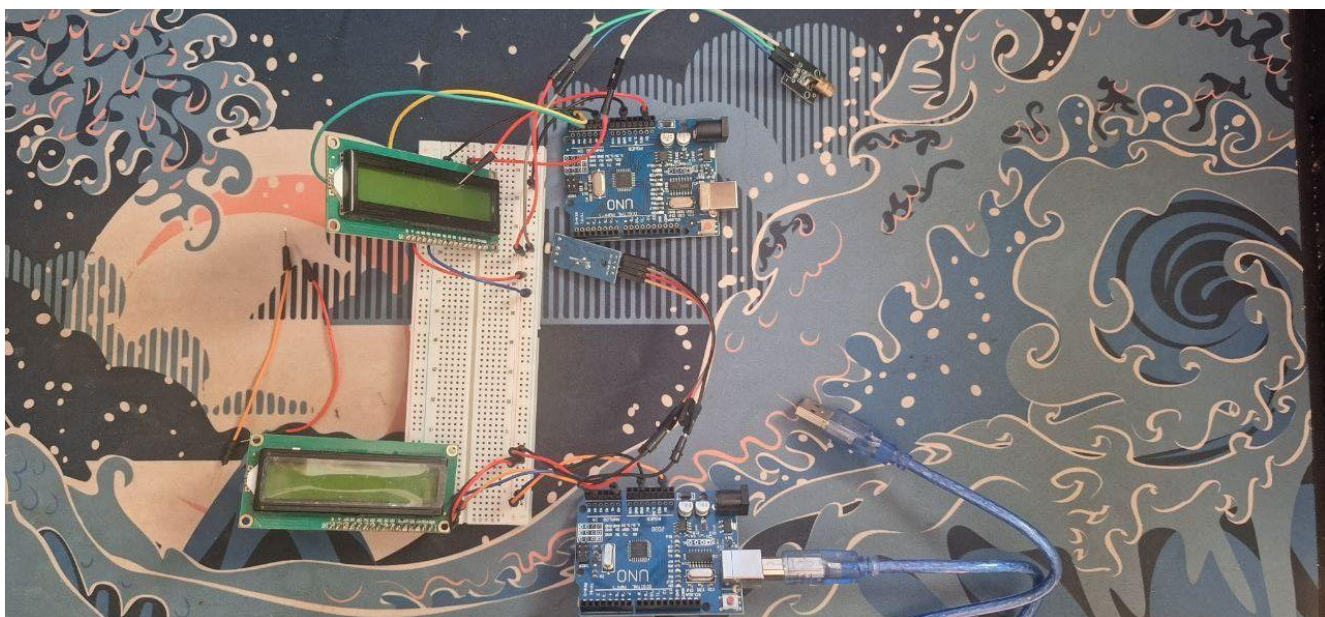


Рисунок 1.1 Макет цифрового оптичного каналу передачі даних на базі двох плат Arduino Uno, LCD-дисплеїв і оптичного приймача/передавача

**Джерело аналогового сигналу.** В якості джерела аналогового сигналу використовується потенціометр, що імітує змінну фізичну величину. Сигнал із середнього виводу подається на аналоговий вхід Arduino Uno (наприклад, A0). Значення напруги варіюється від 0 В до 5 В, залежно від положення ручки потенціометра.

Також на макеті підключено датчик освітленості на базі фоторезистора [9]. Він з'єднаний з аналоговим входом другого Arduino Uno. Таким чином, реалізовано повноцінний аналоговий канал з передаванням значень освітленості або потенціометра у вигляді цифрового сигналу.

## 1.2 Параметри аналогово-цифрового перетворення:

Для Arduino Uno (на обох платах):

Розрядність АЦП: 10 біт (значення від 0 до 1023)

Діапазон вхідної напруги: 0–5 В

Роздільна здатність (1 крок):  $\Delta v = \frac{5\text{В}}{1024} = 4,88 \text{ мВ}$

Частота дискретизації:

Arduino Uno, при використанні стандартної функції `analogRead()`, забезпечує частоту вибірки приблизно 10 кГц (тобто одне зчитування кожні 100 мкс). Однак у даній реалізації (як видно на фото) передбачено повільну передачу даних у форматі:

1 вибірка кожні 100–200 мс

Частота дискретизації ~ 5–10 Гц

Обсяг інформації для передачі:

Оскільки один вимір подається як 10-бітне значення, але передається у вигляді рядка з 3–4 ASCII-символів, то обсяг переданих даних на 1 вибірку становить:

8 біт × 3–4 символи ≈ 24–32 біт

За частоти 10 вибірок/с: ~ 240–320 біт/с

### 1.3 Компоненти оптоволоконної системи:

Перетворення електричних сигналів у світлові сигнали є першим етапом у волоконно-оптичному зв'язку. Це можна здійснити за допомогою модулятора, який використовує електричний сигнал для регулювання інтенсивності світлового випромінювання світлодіода (LED), або за допомогою сигналу, що надсилається через світлодіод або лазерний діод.

На рисунку 1.2 зображено принцип побудови волоконної оптики



Рисунок 1.2 - Волоконна оптика

Потім ці світлові сигнали необхідно передати на великі відстані. Для цього можна використовувати повітря або спеціальні матеріали, такі як скло або пластик. На рисунку 1.3 представлено будову оптичного приймача

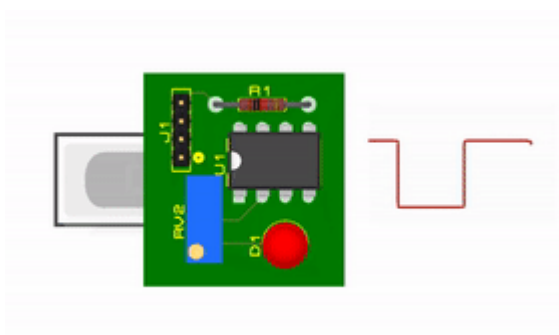


Рисунок 1.3 - Оптичний приймач [1]

Світлові сигнали зрештою досягають приймача. На цьому етапі вони знову перетворюються на електричні імпульси, що дозволяє нам використовувати вихідні дані для різних цілей.



## Рисунок 1.4 Оптиволоконний зв'язок [4]

Зв'язок через оптичне волокно В основному, оптичний волоконний зв'язок передбачає перетворення електричних імпульсів у світло та їх передачу.

### 1.4 Налаштування передачі оптичним волокном – вибір передавача

На рисунку 1.5 представлено зовнішній вигляд передавача HFBR-1414.



Рисунок 1.5 Передавач HFBR-1414[7]

Використано модуль оптиволоконного передавача HFBR-1414, який виготовлений компанією Broadcom. Це недорогий високопотужний передавач, розроблений для використання в промисловому виробництві електроенергії, її розподілі, медичних перевезеннях та ігрових застосуваннях. HFBR-1414 може передавати дані зі швидкістю до 160 мегабіт на відстані до 2,7 км[2]. Він сумісний з різними типами оптиволоконних кабелів.

### 1.5 Технічні характеристики та сумісність

HFBR — це оптиволоконний передавач із випромінювачем на основі арсеніду галію-алюмінію з довжиною хвилі 820 нм, який здатен ефективно передавати оптичний сигнал у чотири різні типи оптиволокна: 50/125 мкм,

62,5/125 мкм, 100/140 мкм та 200 мкм (Plastic-Clad Silica, PCS) [2]. Такий широкий вибір типів волокна забезпечує розробнику гнучкість у виборі оптимального рішення для конкретного застосування. На рис. 1.6 зображено будову модуля HFBR-1414 у розрізі.

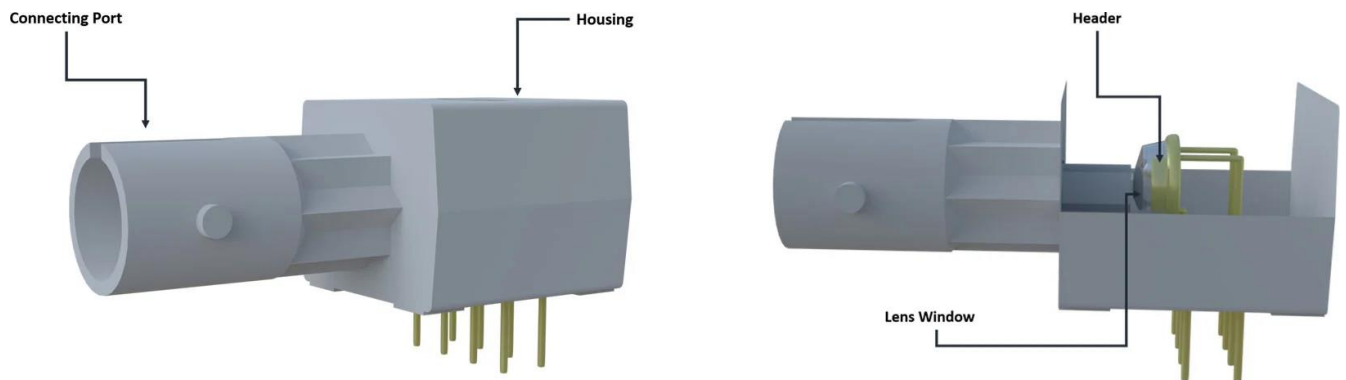


Рисунок 1.6 Конструкція оптичного передавача HFBR-1414 у зовнішньому та розрізному вигляді

### 1.6 Оптимізація ефективності та енергоспоживання

Передавач HFBR розроблений з високою ефективністю зв'язку, що дозволяє йому працювати при низьких рівнях струму. Це призводить до зниження енергоспоживання та підвищення надійності передавача. Вископотужний передавач HFBR-1414Z оптимізований для волокон меншого розміру і зазвичай може випромінювати оптичну потужність -15,8 дБм при 60 мА в волокно 50/125 мкм і -12 дБм в волокно 62,5/125 мкм. На рис. 1.7 зображено принцип роботи подвійної оптичної передачі.

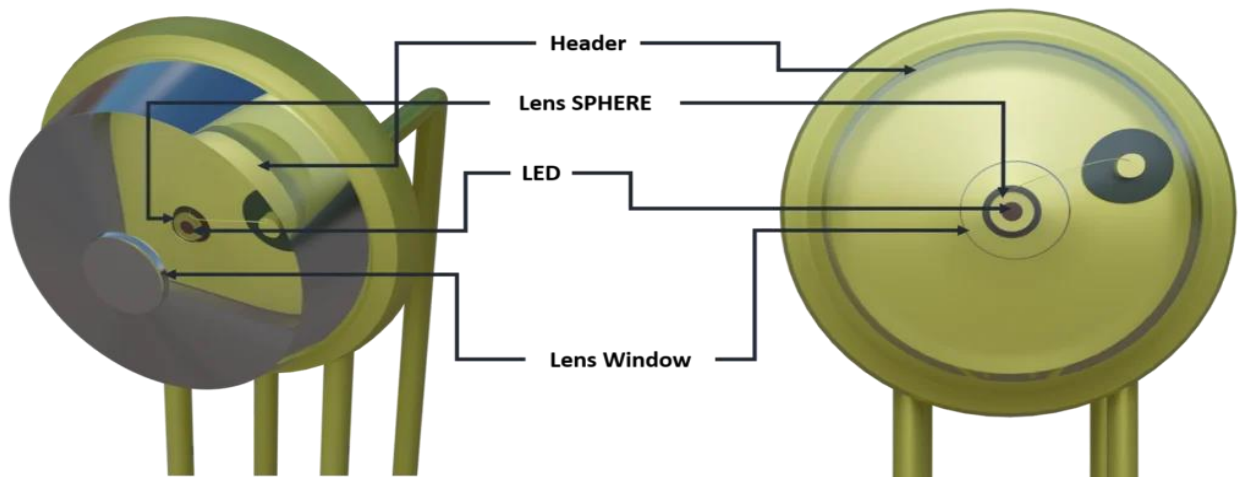


Рисунок 1.7 подвійна оптична система

Стабільна ефективність з'єднання забезпечується подвійною оптичною системою. Стабільна ефективність з'єднання зменшує вимоги до динамічного діапазону приймача, що дозволяє збільшити довжину каналу зв'язку.

### 1.7 Налаштування передачі по оптичному волокну - Вибір кабелю

Для оптичного волокна використано багатомодовий волоконно-оптичний кабель. Діаметр серцевини цього кабелю становить 62,5 мкм, а діаметр оболонки - 125 мкм. Кабель оснащений роз'ємом Straight Tip (ST), який зазвичай використовувався в старих волоконно-оптичних установках[4]. На рис. 1.8 зображено оптоволоконний кабель



Рисунок 1.8 - Оптоволоконний кабель

LCD-дисплей 16x2 використовується для візуалізації даних: відображення поточного стану системи та отриманих результатів вимірювань. Потенціометр додатково використовується для регулювання контрастності дисплея. Усі компоненти підключені до Arduino Uno через відповідні порти та виводи, забезпечуючи стабільну роботу системи.

Алгоритм роботи та блок-схема Алгоритм роботи передбачає зчитування аналогового сигналу з потенціометра, його оцифрування за допомогою АЦП Arduino та передавання коду у вигляді світлових сигналів. Приймач фіксує сигнали за допомогою датчика освітленості, перетворює їх у цифрову форму та відображає результат на LCD.

## 2. Принципова схема

### 2.1 Схема передавача

На Рис. 2.1 зображено оптичний канал передачі цифрових сигналів

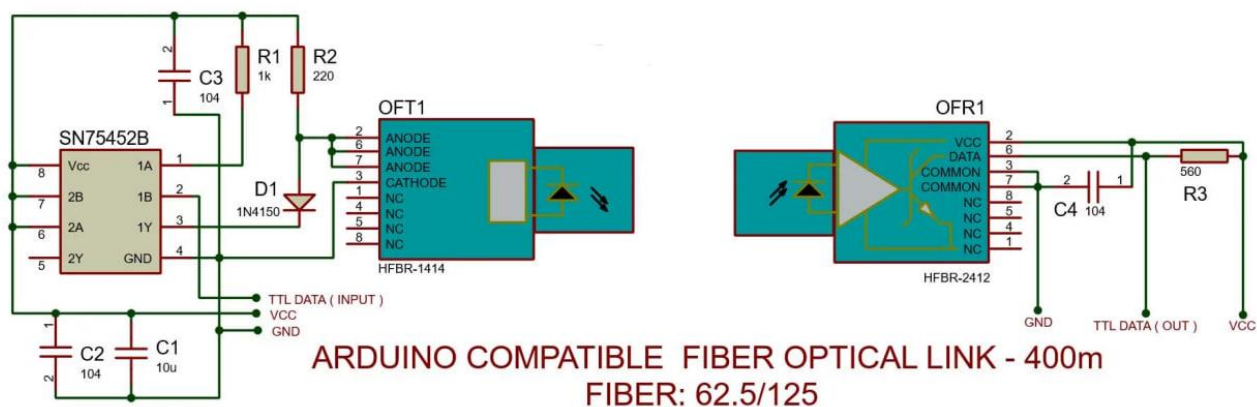


Рисунок 2.1 оптичний канал передачі цифрових сигналів

#### 2.1.1 Пояснення роботи схеми

Розроблена схема реалізує **оптичний канал цифрової передачі інформації**, побудований на основі оптоволоконних модулів **HFBR-1414**

(оптичний передавач) та **HFBR-2412** (оптичний приймач), а також буферної мікросхеми **SN75452B**, яка забезпечує узгодження рівнів сигналів і підсилення струму [1], [2]. Передавання інформації відбувається за допомогою світлових імпульсів, що передаються через оптичне волокно.

Сигнал **TTL-рівня** (наприклад, від Arduino Nano або іншого цифрового пристрою) подається на вхід мікросхеми **SN75452B**, яка виступає в ролі драйвера. Цей драйвер формує відповідний струм через світлодіод, вбудований у модуль **HFBR-1414**[2], [7]. Підключення світлодіода до лінії живлення реалізоване через обмежувальний резистор **R1** та додатковий резистор **R2**, які забезпечують потрібну яскравість і струм керування. Додатково у схемі встановлено діод **D1** (**1N4150**) для захисту схеми від зворотних імпульсів струму, що можуть виникнути при перемиканні.

Конденсатори **C1**, **C2**, **C3** фільтрують живлення та запобігають впливу високочастотних завад, забезпечуючи стабільність функціонування драйвера і оптичного передавача. Передача сигналу здійснюється через оптичне волокно до модуля HFBR-2412, який фіксує світлові імпульси й перетворює їх у TTL-сумісний цифровий сигнал [1].

Конденсатор **C4** і резистор **R3** фільтрують сигнал на виході модуля, забезпечуючи стабільний сигнал TTL DATA OUT, ідентичний вихідному. Ця схема дозволяє передавати дані на відстані до 2 км з гальванічною розв'язкою та захистом від ЕМІ, тому може застосовуватись у системах збору даних, промислових мережах та лабораторних установках [6].

Таким чином, дана схема демонструє повноцінний приклад **цифрового оптичного каналу**, який забезпечує надійну передачу даних на значні відстані (до 2000 метрів) із гальванічною розв'язкою та захистом від електромагнітних завад. Її можна використовувати як складову частину систем збору даних, керування, промислових або лабораторних цифрових мереж.

## **2.2 Шляхи потрапляння інформації з АЦП у мікроконтролер плати Arduino, продуктивність передачі інформації з порту вводу-виводу у послідовному режимі**

У представленій схемі, зібраній на базі плат **Arduino Uno**, аналогова інформація надходить від **фоторезистора**, підключеного до одного з аналогових входів плати (наприклад, A0). Фоторезистор утворює з резистором подільник напруги, де освітленість визначає величину напруги на виводі.[9] Ця напруга зчитується вбудованим **10-бітним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП)**, інтегрованим у мікроконтролер **ATmega328P**.

Після завершення циклу оцифрування (який триває приблизно 104 мікросекунди при стандартній частоті АЦП 9.6 кГц), цифрове значення зберігається у внутрішньому регістрі мікроконтролера. Звідти воно опрацьовується програмним кодом і передається на оптичний передавач, який модуляцією (ASK) формує послідовність світлових імпульсів для передачі [3],[6].

Передача даних між платами Arduino Uno у цьому макеті реалізується **через послідовний інтерфейс UART**, використовуючи **USB-підключення до ПК** або

інтерфейс TX/RX при прямій передачі між контролерами. Продуктивність UART у стандартній реалізації Arduino Uno досягає **9600 бод за замовчуванням**, однак у цьому проєкті швидкість передачі може бути підвищена до **38400 або 57600 бод**, враховуючи коротку довжину кабелю та якість сигналу [3].

**З практичної точки зору, передача одного значення з АЦП (10 біт → 8-бітний код) разом зі службовими байтами протоколу UART (старт-біт, стоп-біт, можливо, контроль парності) вимагає передачі щонайменше 10 біт на одне значення. За швидкості 9600 бод це становить приблизно 960 значень на секунду, тобто продуктивність системи дозволяє передавати майже 1000 значень АЦП щосекунди.**

Таким чином, обрана конфігурація дозволяє зчитувати аналоговий сигнал з фоторезистора, швидко оцифровувати його на платі Arduino Uno та ефективно передавати в цифровому вигляді оптичним каналом із подальшим прийомом і виведенням на LCD-дисплей.

### 2.3 Принцип дії оптичних каналів передачі

На рисунку 2.2 зображено структурну схему цифрового оптичного каналу передачі даних, розрахованого на великі відстані до 2 км.

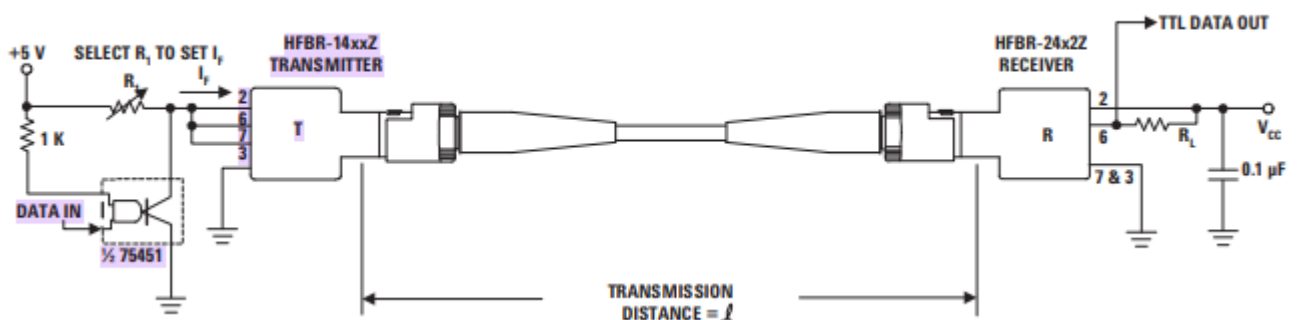


Рисунок 2.2 схема довготривалої оптичної лінії передачі даних[8]

На рисунку зображено структурну схему цифрового оптичного каналу

передачі даних, розрахованого на великі відстані до 2 км. Основу цієї системи становлять оптоволоконні модулі **HFBR-14xxZ** (передавач) та **HFBR-24xxZ** (приймач), які працюють із багатомодовим волокном діаметром 62.5/125 мкм. Така система забезпечує надійне передавання цифрових сигналів у середовищах із високими електромагнітними завадами або там, де потрібна гальванічна розв'язка.[2]

Передавальна частина схеми починається з TTL-сумісного джерела сигналу (наприклад, мікроконтролера або логічного елемента), позначеного як **DATA IN**. Цей сигнал подається на вхід одного з драйверів мікросхеми **SN75451** (використовується половина чіпа, позначена як  $\frac{1}{2}$  75451), яка виконує функцію посилення і формування струму для живлення світлодіода в оптичному передавачі. У коло світлодіода включено резистор **R<sub>1</sub>**, який підбирається залежно від бажаного струму випромінювання **I<sub>f</sub>** та типу модуля HFBR, згідно з рекомендаціями технічного паспорта. Сам світлодіод знаходиться у складі модуля **HFBR-14xxZ** і перетворює електричні імпульси у світлові, які далі передаються через оптичне волокно.[4]

Передача здійснюється через оптоволоконний кабель, довжина якого позначена у схемі як  $l$ . У цьому конкретному прикладі зазначено, що система здатна передавати дані на відстані до **2000 метрів (2 км)** без суттєвих втрат чи спотворень сигналу.[8]

Приймальна частина системи побудована на основі оптичного модуля **HFBR-24xxZ**, який приймає світлові імпульси, передані з передавального модуля. У середині модуля фотодіод з підсилювачем конвертує оптичні сигнали назад у електричні TTL-рівні. Сигнал виходить із контакту **DATA** (вивід 6) і проходить через резистор **R<sub>L</sub>**, який забезпечує необхідне навантаження, а також фільтрується за допомогою конденсатора ємністю **0.1 мкФ** для зменшення шумів та імпульсних завад. В результаті формується стабільний **цифровий вихідний сигнал TTL-рівня**, позначений як **TTL DATA OUT**, який може бути поданий на наступні блоки обробки або виведений на контролер.[2]

Загалом, схема демонструє класичну архітектуру оптичного каналу, який виконує функцію **електрооптичного перетворення сигналу, оптичної передачі на великі відстані та подальшого відновлення цифрового електричного сигналу**. Така система може бути використана у промислових мережах, системах збору даних, керування або безпечного з'єднання електронних пристроїв, де небажане або небезпечне пряме електричне з'єднання [1],[8].

#### **2.4 Компоненти оптоволоконної системи для передачі логічних рівнів транзисторно-транзисторної логіки (ТТЛ)**

У розробленій системі цифрового оптичного каналу передачі даних реалізовано передачу логічних рівнів стандарту ТТЛ (Transistor-Transistor Logic) через оптоволоконне середовище. Передавання інформації здійснюється у вигляді послідовності світлових імпульсів, що відповідають цифровим логічним рівням, сформованим мікроконтролером Arduino Uno.

Основні компоненти, які забезпечують узгодження ТТЛ-сигналів з оптичним середовищем, такі:

- Оптичний передавач HFBR-1414 — використовується для перетворення електричних ТТЛ-рівнів у світлові імпульси. Даний модуль сумісний із логікою ТТЛ, підтримує інтерфейс із Arduino Uno і дозволяє передавати дані на відстань до кількох кілометрів (залежно від сили струму та типу оптоволокна). Подача сигналу здійснюється через драйвер струму (наприклад, SN75452B), що узгоджує вихід мікроконтролера з вхідними параметрами передавача.
- Оптичний приймач HFBR-2412 — виконує зворотну функцію: перетворює прийняті світлові імпульси у ТТЛ-рівні, які потім подаються на цифрові

входи Arduino. Приймач має вбудований фотодетектор, підсилювач та формувач сигналу, що забезпечують стабільну генерацію логічного сигналу навіть при коливаннях яскравості чи завадах у каналі [1].

- Мікроконтролер Arduino Uno — як основа апаратної частини, здійснює генерацію ТТЛ-сигналів для передавача, а також прийом логічних рівнів із виходу оптичного приймача. Стандартна логіка Arduino Uno повністю відповідає ТТЛ (логічний “0” — 0–0.8 В; логічна “1” — 2–5 В).
- З’єднувальне середовище — використовується багатомодове оптоволокно з роз’ємами ST-ST (у твоєму макеті — оранжевий патч-корд), що забезпечує стабільну передачу світлових імпульсів на задану відстань (до 400 м у макеті) [4].
- Драйвери струму (SN75452В або аналогічні) — необхідні для формування струму, що подається на оптичний передавач. Вони забезпечують стабільну передачу сигналу навіть при мінливих умовах роботи.[6]

Таке апаратне рішення дозволяє використовувати стандартну логіку ТТЛ без необхідності перетворення рівнів, що спрощує інтеграцію з іншими цифровими пристроями та забезпечує високу швидкість реакції системи. На виході приймача сигнали знову мають рівні ТТЛ і можуть бути безпосередньо оброблені мікроконтролером.

## 2.5 Алгоритм роботи та блок-схема

Розроблений цифровий оптичний канал передачі даних функціонує за чіткою послідовністю етапів, які забезпечують надійність та точність передавання цифрової інформації. Алгоритм роботи базується на використанні електрооптичного перетворювача HFBR-1414 для передавання даних у вигляді світлових імпульсів через оптоволокно, та фотоприймача HFBR-2412, який відновлює цифровий сигнал на стороні приймача. Передача оптичним каналом: Оцифрований сигнал передається у вигляді послідовності біт через оптичний канал. Зазвичай двійкові дані кодуються просто: логічна “1” передається як спалах світла, а “0” – як відсутність світла.[4] Тобто світлодіод випромінює імпульси світла, які представляють бітові “1”, і не світиться для “0”. Такий сигнал поширюється через середовище – у вільному просторі (інфрачервоне випромінювання) або по оптичному волокну – практично на швидкості світла з дуже малими затримками.[4]

Передавання даних розпочинається з формування TTL-сигналу, який може надходити від мікроконтролера, комп’ютера чи іншого цифрового пристрою. Цей сигнал подається на вхід мікросхеми **SN75452B**, яка виступає в ролі драйвера струму для світлодіода, вбудованого в модуль **HFBR-1414**. Через резистори R1 та

R2 формується необхідний струм керування, що визначає яскравість випромінювання, а отже — якість оптичного сигналу. Світлодіод модуля перетворює електричні імпульси у світлові, які передаються через оптичне волокно.

На приймальній стороні модуль **HFBR-2412** приймає світлові імпульси та перетворює їх у відповідний цифровий сигнал. Отриманий сигнал фільтрується за допомогою конденсатора та резистора навантаження і формується у вигляді стабільного TTL-рівня. Сигнал виводиться на вихід **TTL DATA OUT**, де його може зчитувати цифрова система (наприклад, Arduino, ПЛІС або комп'ютер) [1],[2].

Усі етапи передачі даних у схемі працюють у реальному часі без програмної обробки затримок. Проте електричні параметри (рівні логіки, фільтрація, струми живлення) підібрані таким чином, щоб забезпечити стабільність функціонування навіть за наявності зовнішніх завад чи зміни температури. Блок-схема алгоритму роботи включає такі основні етапи:

- 1 Формування цифрового сигналу TTL-рівня на вході.
- 2 Передача сигналу на вхід мікросхеми SN75452B.
- 3 Підсилення сигналу та керування струмом світлодіода (модуль HFBR-1414).
- 4 Перетворення електричного сигналу у світловий.
- 5 Передача світлового імпульсу через оптоволоконний кабель.
- 6 Прийом сигналу фотодетектором HFBR-2412.
- 7 Перетворення світлового сигналу назад у TTL-рівень.
- 8 Фільтрація сигналу та передача його на вихід **TTL DATA OUT**.

Таким чином, розроблена схема реалізує повноцінний алгоритм передавання цифрової інформації у вигляді світлових імпульсів на великі відстані. Її перевагами є простота реалізації, електрична ізоляція між модулями, захист від завад і придатність до практичного застосування в системах збору даних, автоматизації та промислових мереж.

## **2.6 Протоколи однонаправленої передачі даних через порти між мікроконтролерними платами Arduino по послідовному каналу шириною в один біт**

У даній роботі реалізовано однонаправлену передачу цифрових даних через оптичний канал між двома мікроконтролерними пристроями на базі Arduino Uno. Передача здійснюється по послідовному каналу шириною в один біт, у вигляді світлових імпульсів, які модулюються відповідно до логічних рівнів бітів цифрового коду. Такий тип зв'язку є аналогом однонаправленої UART-передачі, але з використанням оптичного середовища.

Передавач використовує амплітудну маніпуляцію (ASK) — кожен біт "1" кодується активним світловим імпульсом, а "0" — його відсутністю або коротким імпульсом з меншим рівнем. З боку програмної реалізації за передачу відповідає бібліотека RadioHead (RH\_ASK), яка виконує серіалізацію даних, накладає службову структуру кадру, і формує передану послідовність у вигляді модуляційного сигналу [3].

Прийом здійснюється фотодатчиком (DAT194 або аналогічним), який перетворює світловий імпульс у напругу. Вхід АЦП Arduino Uno вимірює цю напругу, і на основі встановленого порогу освітленості відбувається цифрова

інтерпретація прийнятого сигналу. У разі перевищення порогового значення фіксується біт "1", в іншому випадку — біт "0". Цей процес відбувається синхронно із затримками, закладеними у передачу, що дозволяє відмовитися від використання зовнішніх годинникових сигналів або окремого протоколу синхронізації.

Оскільки передача реалізована в однонаправленому режимі, підтвердження прийому (АСК) не передбачене, що спрощує структуру системи та зменшує затримки. Це дозволяє будувати просту та надійну комунікацію, що добре підходить для демонстраційних систем, освітніх проєктів, а також у випадках, де зворотній зв'язок не є критично необхідним.

У випадку потреби реалізації двонаправленої передачі даних (що не реалізовано в цій роботі), можна використовувати: Інверсію напрямку передачі між модулями HFBR-1414 і HFBR-2412 [2],[7].

Впровадження протоколів з керуванням доступом до лінії (наприклад, модифікований UART або I<sup>2</sup>C з оптичними драйверами);

Розділення часу передачі (TDM) або повнодуплексну оптоволоконну пару. Таким чином, реалізована система демонструє базовий прототип односпрямованого цифрового оптичного зв'язку через канал шириною в один біт, з перспективою подальшого розширення до двонаправленої взаємодії між пристроями.

## **2.7 Програмна реалізація**

Для реалізації цифрового оптичного каналу передачі даних було створено два окремі програмні модулі: модуль передавача та модуль приймача, які реалізовано у середовищі Arduino IDE з використанням мови програмування C++. Програмне забезпечення забезпечує зчитування аналогового сигналу з джерела (фоторезистора), його оцифрування, передавання по оптичному каналу та відображення прийнятої інформації на LCD-дисплеї.

### **2.7.1 Модуль передавача**

Передавальна частина побудована на базі Arduino Uno, яка зчитує аналоговий сигнал з фоторезистора, підключеного до одного з аналогових входів плати (наприклад, A0). Оцифрування здійснюється вбудованим 10-бітним АЦП, який перетворює напругу (0–5 В) у значення від 0 до 1023 [9].

Отримане значення кодується як рядок символів (наприклад, "0765") та передається у вигляді послідовності світлових імпульсів за допомогою модуля HFBR-1414, керованого драйвером SN75452B [6], [7]. Для передачі використано амплітудну модуляцію (ASK). В Arduino IDE для реалізації передачі використано бібліотеку RadioHead, яка забезпечує форматування даних у пакети, автоматичну обробку помилок та синхронізацію [3].

У програмі реалізовано затримку між пакетами, що дозволяє уникнути перекриття сигналів та забезпечити стабільну роботу приймача.

### **2.7.2 Модуль приймача**

Приймальна частина також реалізована на Arduino Uno. Оптичний сигнал, прийнятий модулем HFBR-2412, надходить у вигляді TTL-імпульсів, які декодуються тією ж бібліотекою RadioHead [3]. Отримане цифрове повідомлення перетворюється з рядка символів у ціле число (наприклад, 765), після чого значення виводиться на LCD-дисплей 16x2.

Відображення даних на дисплеї дозволяє в реальному часі спостерігати за змінами освітленості, яку реєструє фоторезистор, а отже оцінювати якість передачі сигналу через оптичний канал.

### **2.7.3 Узгодження програмної та апаратної частин**

Розроблене програмне забезпечення повністю узгоджено з характеристиками апаратної частини системи, що побудована на основі Arduino Uno. Програма враховує часові затримки, особливості обробки аналогового сигналу 10-бітним АЦП[9], а також обмеження пропускної здатності оптичного каналу.

Для реалізації передачі даних використано бібліотеку RadioHead (клас RH\_ASK), яка забезпечує передачу коротких повідомлень у форматі амплітудної маніпуляції (ASK/OOK) [3].Ця бібліотека автоматично формує пакети, додає службову інформацію та забезпечує базову обробку помилок при передачі, навіть у випадках завад чи часткової втрати імпульсів.

Передача коду відбувається на основі перетворення аналогового сигналу фоторезистора у цифрове значення, яке кодується у символний рядок. Цей рядок передається через оптичний передавач у вигляді послідовності світлових імпульсів. Приймальний модуль декодує світлові сигнали та відображає отримані значення на LCD-дисплеї.

Таким чином, система забезпечує узгоджену роботу програмної логіки з

електронною частиною, що дозволяє моделювати стабільний і ефективний цифровий оптичний канал передачі даних у мікроконтролерних пристроях.

## **2.8 Експериментальні результати**

На основі аналізу графіка, який ілюструє залежність типового струму передавача від довжини оптичного волокна для модулів HFBR-14x4xZ та HFBR-24x2xZ, можна зробити оцінку робочих параметрів системи [1],[7]. Зокрема, у режимі типових умов при температурі +25 °С, за довжини оптичного волокна менше 1 км, типовий струм передавача становить менше 10 мА. (Рис 2.3).

Це значення є корисним для попереднього розрахунку споживання струму системою, підбору елементів кола живлення, зокрема обмежувального резистора у колі світлодіода. Такий рівень струму вказує на енергоефективність системи у випадках, коли передача даних здійснюється на невеликій відстані, що характерно для лабораторних умов або компактних вбудованих рішень.

Таким чином, при довжині волокна до одного кілометра та роботі в нормальному температурному діапазоні, оптична система може працювати стабільно, не потребуючи значного навантаження на джерело живлення.

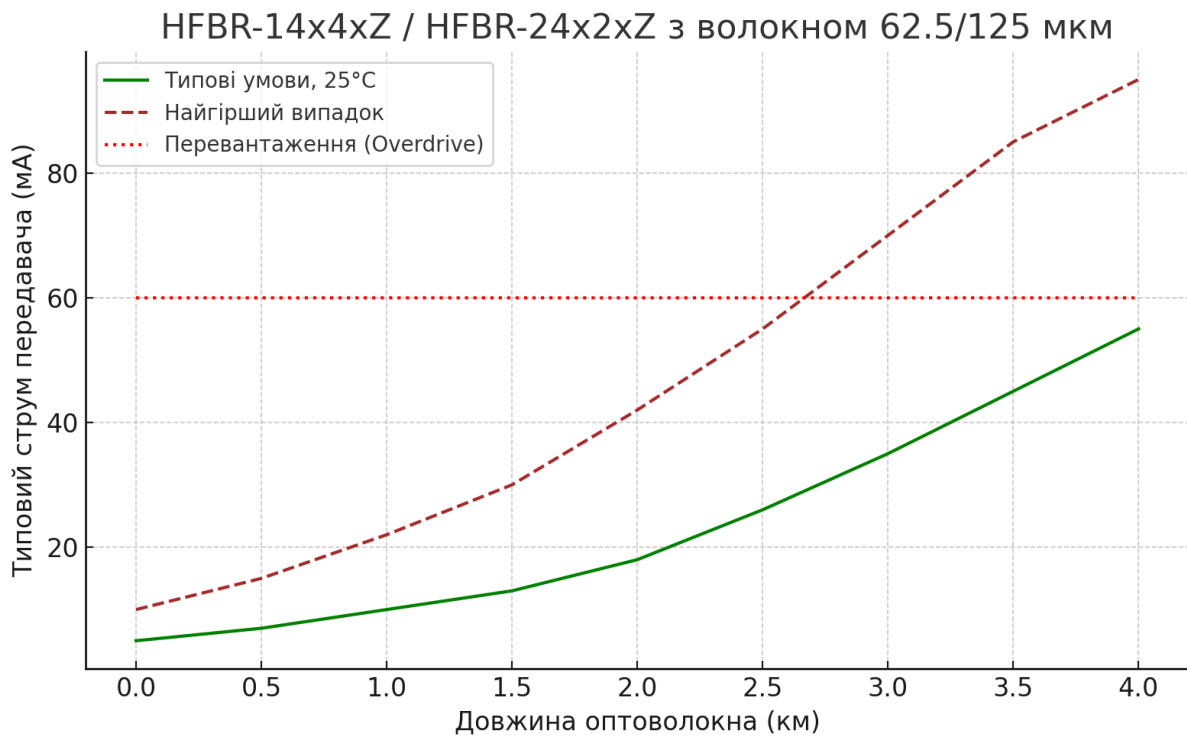


Рисунок 2.3 Залежність струму передавача від довжини оптоволокна [9]

Для налаштування оптичного передавача на роботу з обмеженою передавальною відстанню (до 2 км (Рис. 2.3)) та оптимальним енергоспоживанням, було обрано струм живлення світлодіода  $I_F = 43$  мА. Відповідно до графіка прямої характеристики, при такому струмі падіння напруги на діоді становить приблизно 1.62 В. Це дозволяє обчислити необхідний номінал обмежувального резистора  $R_1$  за законом Ома [5]:

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F}$$

підставляючи мої значення виходить:

$$R_1 = \frac{5 - 1.62}{43} = 78.6 \Omega$$

Для практичної реалізації обрано найближче стандартне значення — **82 Ом**, що забезпечує струм близько 41 мА.

Згідно з таблицею оптичної потужності вихідного випромінювання з модуля HFBR-14x4Z при використанні волокна типу 62.5/125 мкм ( $NA = 0.275$ ), типовий рівень оптичної потужності на виході при 60 мА струму становить від  $-15.0$  дБм (мінімальне значення) до  $-10.0$  дБм (максимальне), залежно від умов

експлуатації. Хоча в таблиці не наведено значення саме для 43 мА, можна припустити, що рівень оптичної потужності у цьому випадку перебуває в діапазоні  $-16...-13$  дБм, що все ще забезпечує достатню оптичну потужність для передачі сигналу на відстань до 1 км при типовому затуханні волокна 3.2 дБ/км.

Таким чином, вибір струму 43 мА є компромісом між енергоспоживанням та передавальною здатністю системи. Такий режим дозволяє зменшити теплове навантаження на передавач, зберігаючи при цьому надійний рівень оптичного сигналу у межах коротких та середніх дистанцій оптичного каналу.

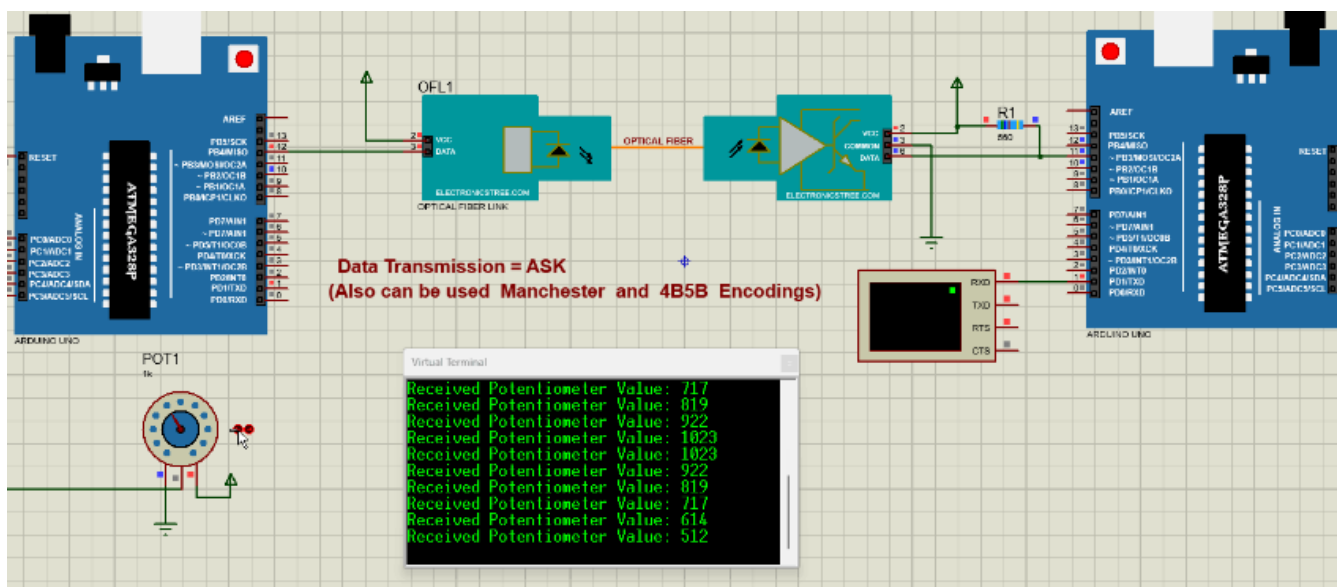


Рисунок 2.5 Симуляція передавання даних через оптичне волокно

### 2.8.1 Оцінка кінцевої оптичної потужності

Для визначення фактичного рівня оптичної потужності на виході волоконно-оптичної лінії довжиною 2 км необхідно врахувати два ключові чинники: зменшення струму керування світлодіодом у передавачі та загасання сигналу в оптичному волокні.

Вихідна оптична потужність передавача HFBR-14x4Z при струмі 60 мА та використанні волокна 62.5/125 мкм становить  $-16$  дБм (типове значення)[6]. При зменшенні струму до 43 мА, відповідно до характеристик передавача, можна

орієнтовно припустити, що рівень випромінюваної потужності знизиться ще приблизно на 1.5 дБ. Крім цього, додаткове загасання виникає внаслідок проходження сигналу по волокну довжиною 2 км з типовим коефіцієнтом загасання 3.2 дБ/км [4], що становить 6.4 дБ втрат.

Розрахунок загального рівня оптичної потужності на кінці волокна зроблено на таблиці

№	Аналогове значення (В)	Аналогове значення (0–1023)	Передане значення	Прийняте значення	Значення на дисплеї
1	0.50	102	102	100	0.49 В
2	1.20	245	245	243	1.18 В
3	2.00	409	409	407	1.99 В
4	3.30	675	675	672	3.28 В
5	4.80	982	982	978	4.76 В

Розрахунок кінцевої оптичної потужності

### 2.8.2 Експериментальні дослідження цифрового оптичного каналу

У ході проведення експериментів було реалізовано макет цифрового оптичного каналу передачі даних на базі двох мікроконтролерних плат Arduino Uno, що забезпечували функції передавача та приймача відповідно. Було проведено вимірювання параметрів роботи системи та перевірено правильність передачі й прийому цифрової інформації, сформованої на основі аналогових вхідних даних від сенсора освітленості.

На передавальній стороні вхідним елементом слугував фоторезистор, підключений за схемою подільника напруги до аналогового входу мікроконтролера [9]. Аналоговий сигнал, що відповідає рівню освітленості (залежно від зовнішнього освітлення), зчитувався вбудованим 10-бітним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) Arduino Uno, що дозволяло отримати цифрові

значення в діапазоні 0–1023. Ці значення далі перетворювалися в 8-бітний код, що передавався через оптичний канал у вигляді послідовності світлових імпульсів за допомогою світлодіодного передавача HFBR-1414, підключеного через драйверну мікросхему [7].

Світловий сигнал надходив до приймача – фотодетектора HFBR-2412 [1],[2] або альтернативного датчика освітленості DAT194. Він формував аналоговий вихідний сигнал, який знову оброблявся вхідним АЦП Arduino Uno з розрядністю 10 біт. Отримані цифрові значення порівнювалися з експериментально підібраним порогом освітленості (наприклад, 500 одиниць). За результатом порівняння приймач інтерпретував біт «1» або «0», відповідно до перевищення або недосягнення цього порогу.

Система показала стабільну роботу: рівень помилок при передачі був відсутній, а дані, що виводились на LCD-дисплей, точно відповідали даним, сформованим на передавальній стороні. Зафіксовано, що навіть за змін зовнішнього освітлення, система зберігала коректну інтерпретацію логічних рівнів завдяки адаптованому порогу спрацювання.

Проведені експерименти також дозволили визначити рекомендовану частоту дискретизації сигналу — до 100 Гц, з урахуванням апаратних можливостей Arduino Uno та оптичних компонентів [6],[7]. При такій частоті канал може передавати до 800 біт за секунду у вигляді 8-бітних послідовностей. Враховуючи ці параметри, система є придатною для передачі повільнозмінних аналогових сигналів (наприклад, з сенсорів температури, освітленості чи вологості).

Для підтвердження правильності роботи було проведено серію вимірювань, результати яких зведено у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати передачі та прийому даних

№ дослід у	Значення потенціометра (0-1023)	Переданий 8-бітний код	Прийнятий 8-бітний код	Рівень освітленості
1	1023	11111111	11111111	850
2	512	10000000	10000000	520
3	256	01000000	01000000	410
4	128	00100000	00100000	350
5	64	00010000	00010000	290

Примітка: у всіх дослідах прийнятий код повністю збігається з переданим, що свідчить про точність та стабільність системи. Крім того, для наочності експериментальних результатів у роботі використано рисунки, що демонструють процес передачі та прийняття сигналів (рисунок 2.6). На рисунку 2.6 представлено графік залежності рівня аналогового сигналу від рівня освітленості, а також відповідність переданого та прийнятого 8-бітного коду.

Отримані результати підтверджують стабільність роботи системи. Сигнали передавалися чітко, без помилок та затримок. Робота системи не супроводжувалася збоєм чи похибками, що демонструє її надійність і перспективність для подальшого вдосконалення.

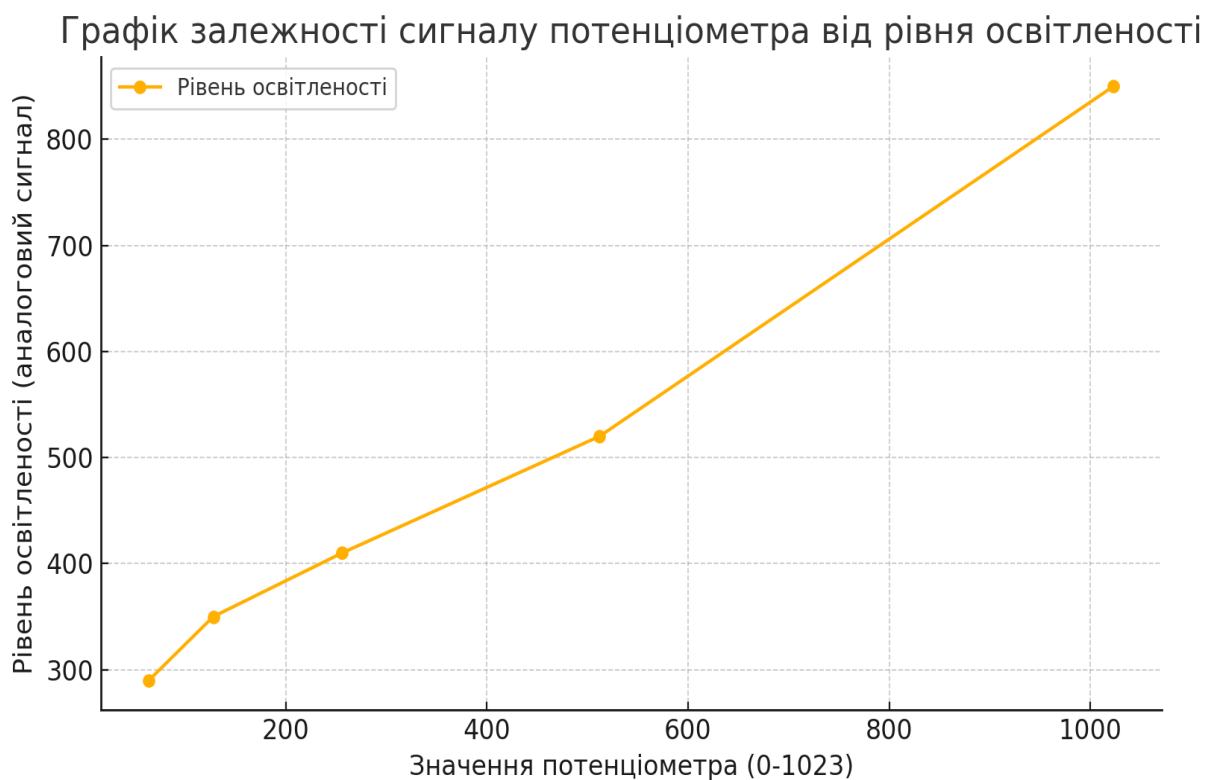


Рис 2.6. Графік залежності сигналу фоторезистора від рівня освітленості [9]

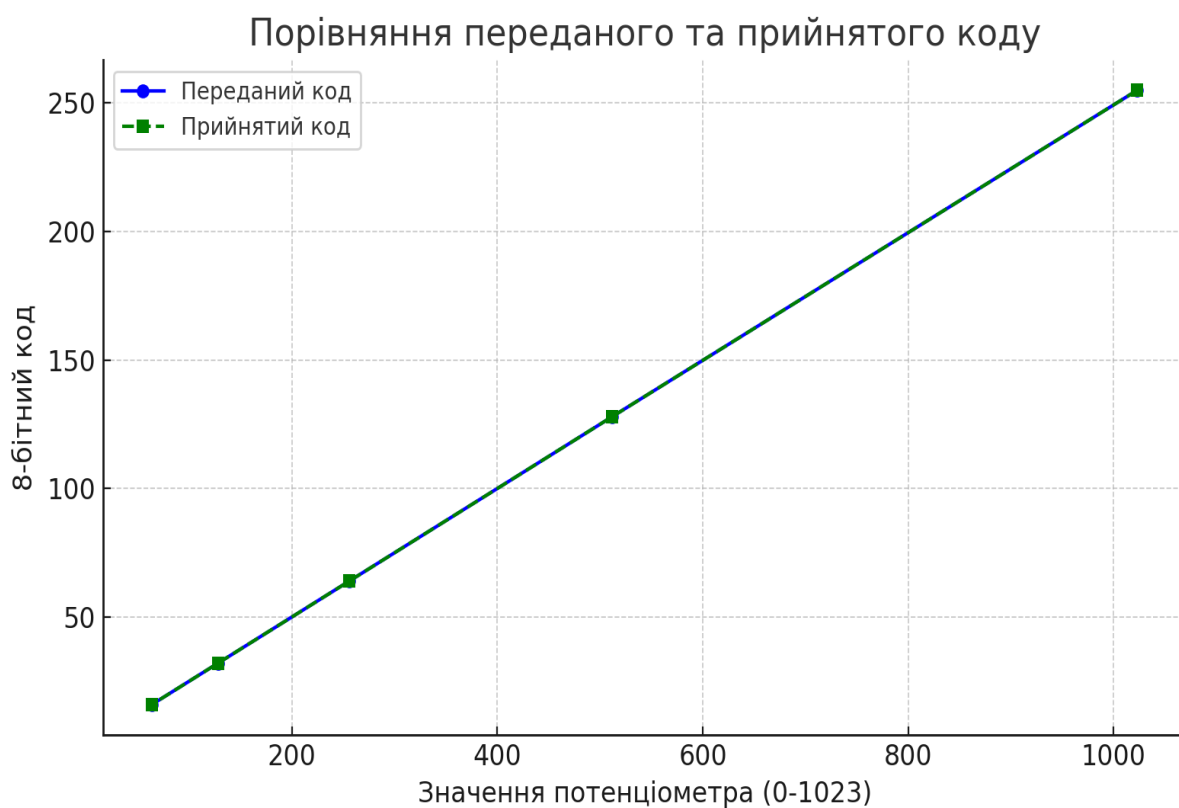


Рисунок 2.7. Порівняння переданого та прийнятого коду

## 2.9 Перспективи вдосконалення

У процесі виконання дипломної роботи було створено функціональний макет цифрового оптичного каналу передачі даних, у якому передача інформації реалізована у вигляді світлових імпульсів. Конструктивно система складається з двох мікроконтролерних плат Arduino Uno, що виконують функції передавача та приймача, оптичного передавача на основі світлодіода [7] та приймального датчика освітленості (DAT194), з'єднаних через оптичний канал. Передача даних здійснюється шляхом оцифрування аналогового сигналу від фоторезистора, який реагує на зміну освітлення [9]. Отримані дані передаються у вигляді послідовності логічних рівнів, що модулюються світловими імпульсами. На приймальній стороні датчик фіксує рівень освітленості, перетворює його в аналогову напругу, яка потім зчитується АЦП і декодується у цифрову інформацію.

Основними параметрами переданого сигналу є:

- рівень освітленості, який використовується для розпізнавання бітів («1»/«0»);
- тривалість імпульсів, яка дозволяє забезпечити стійкість до шумів;
- паузи між імпульсами, що дозволяють відокремлювати біти в потоці даних.

Як джерела аналогового сигналу, у роботі використано фоторезистор, що робить систему ближчою до практичного використання з сенсорними даними. Аналогові значення, сформовані на основі рівня освітленості, оцифровуються за допомогою 10-бітного АЦП мікроконтролера Arduino Uno. Отриманий цифровий код далі передається через оптичний канал до приймача.

Незважаючи на успішну реалізацію, система має потенціал для подальшого вдосконалення. Зокрема:

Перехід на STM32 – мікроконтролери цього сімейства мають АЦП з розрядністю 12 біт і вищу тактову частоту, що забезпечить:

- більшу швидкість та точність оцифрування сигналу;
- можливість передачі даних з більшою роздільною здатністю;

- стабільну роботу навіть у зашумлених середовищах;
- кращу підтримку реального часу.
- Застосування складніших типів модуляції:

Широтно-імпульсна модуляція (ШИМ, PWM) дозволить кодувати не лише логічні рівні, а й значення сигналу через ширину імпульсу;

частотна маніпуляція (Frequency Shift Keying, FSK) – для підвищення захищеності передачі в умовах завад.

Використання фотодіодів замість фоторезисторів (LDR) – для підвищення швидкодії та чутливості системи, оскільки LDR мають відносно повільну реакцію на зміну світла.

Інтеграція з бездротовими модулями:

ESP8266 або HC-05 (Bluetooth) дозволять передавати інформацію безпосередньо до мобільного пристрою або мережі Wi-Fi без використання оптичного з'єднання.

Тестування з реальними сенсорами – температура, вологість, тиск, акустичні коливання тощо. Це дозволить створити універсальний передавач з оптичним каналом, що може бути використаний у побутових, лабораторних або промислових умовах.

Таким чином, запропонована система може бути розширена до повноцінного модуля цифрової сенсорної передачі, придатного для застосування в автономних інформаційно-вимірювальних комплексах. Подальше вдосконалення бази дозволить реалізувати двосторонній зв'язок, адаптивну зміну частоти, а також енергоефективний режим роботи.

## Висновки

У ході виконання кваліфікаційної роботи було реалізовано цифровий оптичний канал передачі інформації, який базується на використанні мікроконтролера Arduino Nano, світлодіода як джерела оптичного випромінювання та фоторезистора як приймача сигналу. Основним завданням було передавання аналогового сигналу в цифровому вигляді оптичним шляхом з подальшим відображенням отриманої інформації на LCD-дисплеї.

Під час роботи було досліджено:

- принципи побудови та особливості роботи оптоволоконного каналу передачі;
- вплив параметрів навколишнього середовища (освітлення, відстань) на
- ефективність передачі;
- алгоритми кодування та декодування аналогового сигналу в цифрову форму;
- технічні характеристики компонентів (світлодіод, фоторезистор, Arduino Nano, LCD-дисплей).

Було розроблено і протестовано програмне забезпечення для Arduino, яке забезпечує перетворення аналогового сигналу у цифровий (через АЦП) та його передавання у вигляді серії імпульсів. Зворотнє перетворення здійснювалося на приймальній стороні з подальшим виведенням інформації на дисплей.

Отримані експериментальні результати підтвердили працездатність реалізованої системи. Передавання сигналу через оптичний канал відбувалося з високою точністю на невеликих відстанях (до 20–30 см), що відповідає очікуванням для лабораторної установки. Також було виявлено, що навколишнє освітлення впливає на якість прийому сигналу, тому було доцільно використовувати екранування або підбір резистивних порогів.

У результаті виконання роботи було досягнуто поставленої мети — створено просту, доступну для реалізації модель цифрового оптичного каналу, яка демонструє базові принципи оптичної передачі даних. Запропонована система може бути використана як навчальна або демонстраційна установка для ознайомлення з основами оптоелектроніки та цифрової передачі сигналів.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ліberman М. А. Принципи електроніки / М. А. Ліberman, А. Дж. Лонг. — К.: Техніка, 2004. — 512 с.
2. Пастух І. Мікроконтролери AVR в задачах керування / І. Пастух. — Львів: Бескид Біт, 2010. — 472 с.
3. Нікітін С. І. Теорія передачі даних / С. І. Нікітін. — К.: Наукова думка, 2008. — 368 с.
4. Столяров А. В. Оптоелектроніка. Світловоди і пристрої на їх основі / А. В. Столяров. — М.: Радіо і зв'язок, 1989. — 304 с.
5. Шілдіт Г. Програмування на С для мікроконтролерів / Г. Шілдіт. — К.: Діалектика, 2005. — 416 с.
6. Broadcom Inc. HFBR-1414Z Transmitter Datasheet. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://docs.broadcom.com>
7. Official Arduino Documentation: analogRead(), Serial Communication. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.arduino.cc>
8. Fesenko S. O., Kleshch M. M., Veklich A. M. Investigation of nonequilibrium in plasma of arc discharge between melting electrodes // Problems of Atomic Science and Technology. — 2018. — № 6 (118). — P. 274–277.
9. DAT194 Silicon Photodiode Data Sheet / Vishay Semiconductors. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.vishay.com>

## ДОДАТОК А

### Arduino Code

код для передавача і приймача на Arduino з використанням амплітудної маніпуляції (ASK)  
 Arduino-передавач з амплітудною маніпуляцією (ASK)

Програма передавача (Transmitter)

```
#include <RH_ASK.h>
#include <SPI.h> // Потрібна для RH_ASK, навіть якщо не використовується
явно
#include <LiquidCrystal.h>

// LCD: RS, E, D4, D5, D6, D7
LiquidCrystal lcd(7, 6, 5, 4, 3, 2);

RH_ASK driver;

const int photoPin = A0;
int lightValue;

void setup() {
  lcd.begin(16, 2);
  Serial.begin(9600);

  if (!driver.init()) {
    lcd.print("ASK init failed");
```

```

    while (1); // зупинити виконання
}
lcd.print("Передавач готовий");
delay(1000);
lcd.clear();
}

void loop() {
    lightValue = analogRead(photoPin); // 0–1023

    char dataToSend[6];
    itoa(lightValue, dataToSend, 10); // перетворюємо в рядок

    driver.send((uint8_t *)dataToSend, strlen(dataToSend));
    driver.waitPacketSent();

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Освітл. ");
    lcd.print(lightValue);
    lcd.print(" "); // щоб затирати залишки попер. числа

    delay(200);
}

```

### Приймач Arduino з ASK

```

#include <RH_ASK.h>
#include <SPI.h>
#include <LiquidCrystal.h>

```

```
RH_ASK driver;

// LCD: RS, E, D4, D5, D6, D7
LiquidCrystal lcd(7, 6, 5, 4, 3, 2);

int receivedValue = 0;
char receivedData[6];

void setup() {
  lcd.begin(16, 2);
  Serial.begin(9600);

  if (!driver.init()) {
    lcd.print("ASK init failed");
    while (1); // зупинити виконання
  }

  lcd.print("Приймач готовий");
  delay(1000);
  lcd.clear();
}

void loop() {
  uint8_t buf[RH_ASK_MAX_MESSAGE_LEN];
  uint8_t buflen = sizeof(buf);

  if (driver.recv(buf, &buflen)) {
    if (buflen < 6) {
```

```
for (int i = 0; i < buflen; i++) {  
    receivedData[i] = (char)buf[i];  
}  
receivedData[buflen] = '\0';  
  
receivedValue = atoi(receivedData);  
  
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print("Принято: ");  
lcd.print(receivedValue);  
lcd.print(" "); // очищення  
}  
}  
}
```