

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Дмитро ТАТАРЧУК
«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»

зі спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

на тему: «Активне інфрачервоне підсвічування для покращення оптичного зображення в умовах низької освітленості об'єкта»

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ДП-21мп
Берест Віталій Юрійович _____

Науковий керівник: Проф. каф. МЕ, к.т.н., проф.,
Борисов Олександр Васильович _____

Консультант з нормоконтролю: доц.каф.МЕ, к.ф.-м.н., с.н.с.,
Свечніков Георгій Сергійович _____

Консультант з інформаційних питань: доц.каф.МЕ, к.т.н., доц.,
Діденко Юрій Вікторович _____

Рецензент: **Посада, науковий ступінь, вчене звання,
Прізвище, ім'я, по батькові** _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2023 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

Кафедра мікроелектроніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Освітньо-професійна програма «Мікро- та наноелектроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Бересту Віталію Юрійовичу

1. Тема дисертації «Активне інфрачервоне підсвічування для покращення оптичного зображення в умовах низької освітленості об'єкта», науковий керівник дисертації Борисов Олександр Васильович, к.т.н., проф., затвержені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____ 25 грудня 2023 року _____

3. Об'єкт дослідження:

Електронна система отримання зображення в умовах низької освітленості.

4. Вихідні дані:

Електронна система побудови та аналізу оптичного зображення з використанням напівпровідникових матричних детекторів у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні, оснащена вузлами активного інфрачервоного підсвічування об'єкта.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- провести аналіз науково-технічної літератури за обраною темою;
- виконати експериментальні дослідження зразків комерційно доступних пристроїв отримання зображення, оснащених вбудованими вузлами ІЧ-підсвічування, проаналізувати режими їх функціонування, не наведені в технічній документації виробника;
- вибрати елементну базу для розробки макетів вузлів підсвічування з можливістю зміни режимів живлення для організації та постановки власного експерименту та

автоматизованої обробки отриманого результату сучасними апаратними та програмними засобами;

- розробити засоби об'єктивної оцінки якості зображення, отриманого в режимі ІЧ-підсвічування, та виконати аналіз отриманих зображень;

- розробити рекомендації стосовно енергоефективних режимів ІЧ-підсвічування для мобільних систем відеоспостереження.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Луцина Б.І. ст. викл. каф. МЕ		
Розділ 2	Луцина Б.І. ст. викл. каф. МЕ		
Розділ 3	Луцина Б.І. ст. викл. каф. МЕ		

9. Дата видачі завдання 1 вересня 2023 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	аналіз науково-технічної літератури за обраною темою	1.09.2023-30.09.2023	
2	дослідження зразків комерційно доступних пристроїв отримання зображення, оснащених вузлами ІЧ-підсвічування, аналіз режимів їх функціонування	1.10.2023-15.10.2023	
3	вибір елементної бази та розробка вузлів елементів підсвічування з можливістю зміни режимів живлення	16.10.2023-18.11.2023	
4	розробка програмних засобів об'єктивної оцінки якості зображення, отриманого в режимі ІЧ-підсвічування, та його аналізу	19.11.2023-9.12.2023	
5	Оформлення результатів роботи, розробка рекомендацій стосовно енергоефективних режимів ІЧ підсвічування, написання магістерської дисертації.	10.12.2023-25.12.2023	

Студент

Віталій БЕРЕСТ

Науковий керівник

Олександр БОРИСОВ

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 94 сторінках і містить 4 розділи, 59 ілюстрацій, 20 таблиць, 16 джерел в переліку посилань, 1 схему електричну принципову, 1 додаток з лістингом програми.

Метою даного дослідження є оптимізація режимів підсвічування об'єкта в умовах його критично низької чи повної відсутності природної освітленості білим світлом для отримання зображення, придатного для наступного суб'єктивного сприйняття, об'єктивного аналізу і оперативного використання в задачах орієнтації на місцевості та в аспекті формування рекомендацій енергоефективного використання акумуляторної батареї мобільного пристрою.

Керуючись метою роботи сформульовано наступні задачі дослідження:

- аналіз науково-технічної літератури за обраною темою;
- експериментальні дослідження зразків комерційно доступних продуктів, оснащених вбудованими вузлами ІЧ-підсвічування, аналіз режимів їх функціонування, не наведених в технічній документації виробника;
- вибір елементної бази та розробка вузлів елементів підсвічування з можливістю зміни режимів живлення для організації та постановки власного експерименту та автоматизованої обробки отриманого результату сучасними апаратними та програмними засобами;
- розробка власних програмних засобів об'єктивної оцінки якості зображення, отриманого в режимі ІЧ-підсвічування, та його аналізу;
- розробка рекомендацій стосовно енергоефективних режимів ІЧ підсвічування для мобільних систем відеоспостереження.

Об'єктом дослідження є електронна система отримання зображення в умовах низької освітленості.

Предметом дослідження є застосування активного ІЧ-підсвічування з метою покращення якості зображення в умовах низької освітленості об'єкта.

Ключові слова: *ІЧ-підсвічування, КМОН- та ПЗЗ-матриця, оптичне зображення, кремнієві фотоприймачі, освітленість об'єктів, модуляція оптичного сигналу.*

ABSTRACT

The work is presented on 94 pages and contains 4 chapters, 59 illustrations, 20 tables, a reference list of 16 sources, 1 electrical schematic diagram, and 1 appendix with program listing. The aim of this research is to optimize the illumination modes of an object under critically low or complete absence of natural white light, to obtain an image suitable for subsequent subjective perception, objective analysis, and operational use in orientation tasks on the terrain and in the aspect of formulating recommendations for energy-efficient use of a mobile device's battery. Guided by the aim of the work, the following research tasks were formulated:

- analysis of scientific and technical literature on the chosen topic;
- experimental studies of commercially available products equipped with built-in IR illumination units, analysis of their operating modes not listed in the manufacturer's technical documentation;
- selection of the component base and development of lighting elements with the possibility of changing power supply modes for organizing and setting up one's experiment and automated processing of the obtained result with modern hardware and software;
- development of one's software tools for objective evaluation of image quality obtained in IR illumination mode and its analysis;
- development of recommendations for energy-efficient IR illumination modes for mobile video surveillance systems.

The object of the study is the electronic system for image acquisition under low-light conditions.

The subject of the study is the application of active infrared illumination to improve image quality under low-light conditions of the object.

Keywords: *IR illumination, CMOS sensor, CCD sensor, optical image, silicon photodetector, object illumination, optical signal modulation.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ	10
1.1 Основи оптичного зображення.....	10
1.2 Огляд матриць	13
1.2.1 Матриці КМОН	13
1.2.2 Матриці ПЗЗ.....	16
1.2.3 Алгоритми зчитування сигналу з матриць	21
1.3 Принципи роботи інфрачервоного підсвічування.....	24
1.3.1 Режими інфрачервоного підсвічування	25
1.3.2 Повнокадрова модуляція світла.....	27
1.3.3 Модуляція за спільним часом.....	28
1.4 Спектральні характеристики кремнієвих фотоприймачів	29
1.5 Спектральні характеристики комерційних випромінювачів на ближній інфрачервоний діапазон.....	37
Висновки до розділу	42
2 МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	43
2.1 Вибір обладнання та програмного забезпечення.....	43
2.1.1 Камера Reolink E1 Outdoor PoE	43
2.1.2 Мережевий пристрій Cudy AC1200 WR1200	45
2.1.3 Світлодіодний драйвер	46
2.1.4 Інфрачервоні світлодіоди	49
2.1.5 NI Elvis II.....	52

	7
2.1.6 Програмне забезпечення NI Elvismx (LabView)	55
2.1.7 Тест роздільної здатності USAF 1951	56
2.2 Методи обробки та аналізу отриманих даних.....	59
2.2.1 Аналіз за яскравістю, різкістю, контрастом та шумами	59
2.2.2 Аналіз за інтенсивністю пікселів.....	60
2.2.3 Статистичний аналіз	60
2.2.4 Аналіз за кореляційною функцією	61
2.2.5 Програмне забезпечення для аналізу	62
Висновки до розділу	64
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	65
3.1 Опис експерименту з активним інфрачервоним підсвічуванням	65
3.2 Аналіз отриманих результатів	66
Висновки до розділу	76
4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	77
4.1 Опис ідеї проєкту	77
4.2 Технологічний аудит ідеї проєкту.....	78
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	78
4.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту	81
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту.....	82
4.6 Висновки	83
ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	85
ДОДАТОК А.....	87

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ІЧ – інфрачервоний діапазон електромагнітного випромінювання

КМОП – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник

ПЗЗ – прилад із зарядовим зв'язком

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

FullHD – англ. Full High Definition – стандарт роздільної здатності 1920x1080 пікселів

WFS – англ. Whole-Frame Strobing – повнокадрова модуляція

STS – англ. Share-Time Strobing – модуляція за спільним часом

LED – англ. Light Emitting Diode – світловипромінювальний діод

PoE – англ. Power over Ethernet – технологія передачі електроенергії та даних за допомогою «звитої пари»

NIR – англ. Near-Infrared – ближній інфрачервоний діапазон

ПЗ – програмне забезпечення

DMM – англ. Digital Multimeter – цифровий мультиметр

RGB – англ. Red-Green-Blue – адитивна колірна модель «червоний-зелений-синій»

ВСТУП

У сучасному світі, де важливість систем відеоспостереження постійно зростає, зокрема у сферах безпеки, моніторингу та контролю, набуває актуальності питання отримання якісного зображення в умовах недостатнього освітлення об'єкта природним білим світлом. Використання додаткового джерела активного підсвічування в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні є одним із ефективних методів покращення якості оптичного зображення в таких умовах. Воно дозволяє отримувати високоякісні зображення в нічний час, що є критичним для багатьох застосувань.

Попри значний прогрес у розвитку інфрачервоних технологій, існують певні виклики та нерозв'язані питання, які потребують подальших досліджень. Серед них - оптимізація параметрів ІЧ-підсвічування, включаючи частоту модуляції та скважність імпульсу, для досягнення найкращих характеристик зображення.

Огляд літератури виявляє, що більшість досліджень фокусується на загальних аспектах використання ІЧ-технологій, проте не надає вичерпних відповідей на питання оптимальних налаштувань ІЧ-підсвічування в залежності від конкретних умов та обладнання. Це створює простір для подальших досліджень з метою вдосконалення систем відеоспостереження, особливо в контексті їх ефективності у нічний час.

Таким чином, дослідження, представлене у цій магістерській роботі, спрямоване на заповнення цього пробілу. Його метою є детальний аналіз впливу параметрів ІЧ-підсвічування на якість зображення, що включає вивчення частоти модуляції, скважності імпульсу, а також порівняльний аналіз результатів з використанням підсвічування в різних діапазонах довжин хвиль ближнього ІЧ спектру.

Це дослідження матиме важливе практичне значення, оскільки воно сприятиме розробці більш ефективних та надійних систем відеоспостереження, що можуть бути широко використані у різноманітних сферах, від безпеки та нагляду до медичної діагностики та астрономічних досліджень.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

1.1 Основи оптичного зображення

Щоб мати уявлення про оптичні системи, маємо ввести поняття оптичного зображення. Отож, оптичне зображення є відтворенням об'єктів унаслідок роботи оптичної системи, що побудована на заломленні чи відбиванні хвиль світла. Такого роду зображення можна фіксувати на поверхнях, що володіють світлочутливими властивостями. Такими поверхнями можуть бути матриця камери, про яку ми будемо говорити далі. Також оптичне зображення можна спостерігати через оптичні прилади, наприклад, мікроскоп або телескоп.

У основі оптичних систем лежать наступні складові: освітлення, оптичні лінзи та камера. Освітлення є способом виділення об'єктів, які цікавлять спостерігача. Об'єктів чи оптичні лінзи здатні приймати з навколишнього середовища інформацію про об'єкти та відтворювати їх на матриці камери. У такому випадку діють закони оптики. Всі три складові поєднуються між собою за допомогою електронних вузлів, програмного забезпечення тощо.

Наведемо основні визначення (рис. 1), що дають уявлення про оптичні системи [1]:

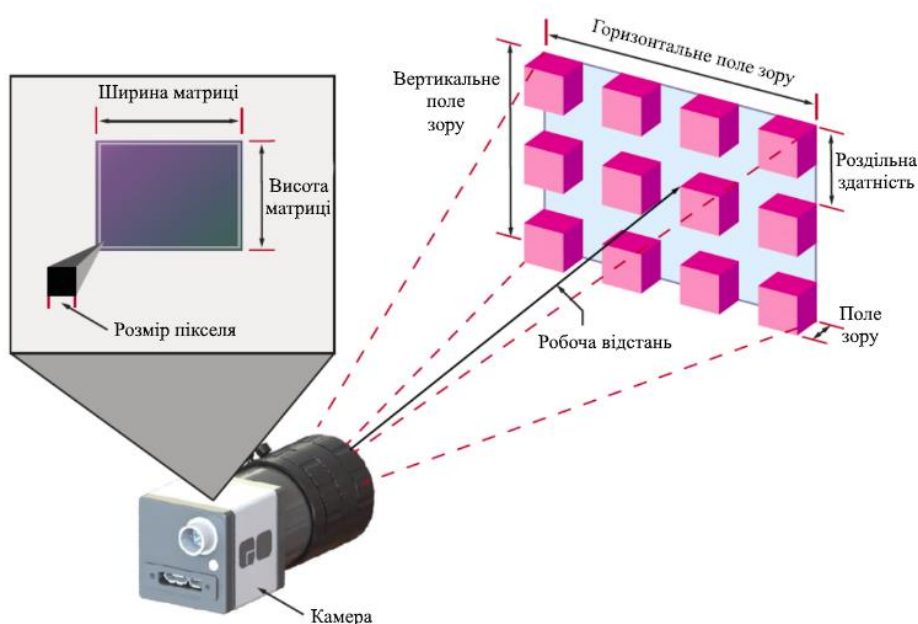


Рисунок 1 – Ілюстрація основних параметрів оптичної системи на основі камери [1]

Поле зору: Площина огляду об'єкта, яка заповнює матрицю камери.

Робоча відстань: Відстань від передньої або першої поверхні лінзи до об'єкта.

Роздільна здатність: мінімальний розмір ознаки об'єкта, який можна розрізнити системою візуалізації, зазвичай визначається як просторова частота в одиницях пар ліній на міліметр. На значення роздільної здатності впливають деякі чинники, як-от розмір пікселів матриці, тип освітлення, що використовується під час роботи оптичної системи, оптичні можливості використовуваних лінз. Розподіл кількості пікселів матриці по геометричній ширині та висоті матриці на розмір об'єкта, за яким проводиться спостереження, показує, яку частину простору займає окремий піксель на об'єкті. Такий підхід можна використовувати при проведенні оцінки роздільної здатності оптичної системи. Для розуміння цього поняття необхідно знати, що саме може обмежувати роздільну здатність оптичної системи. На рис. 2 зображено пара квадратів на білому тлі. Якщо квадрати розташовуються на сусідніх пікселях матриці, вони будуть мати вигляд одного великого прямокутника (рис. 2 – а), а не як два окремі квадрати. Щоб розрізнити геометричні фігури на полотні, між ними має бути принаймні один піксель. Отож мінімальна відстань між пікселями і граничною роздільною здатністю оптичної системи. Обмеження за абсолютним значенням визначається розміром та кількістю пікселів на матриці (рис. 2 – б).

Якщо більш точно описувати поняття роздільної здатності, то можна виразити її через частоту, що виміряна в парах ліній на міліметр (lp/mm). Поняття пари ліній означає пару чорних та білих квадратів у просторі об'єктів [1].

Говорячи про обмеження, можемо стверджувати, що роздільна здатність об'єктива не є абсолютною, оскільки здатність розрізняти квадрати буде залежати від рівня сірого. Оптична система здатна більш легко розпізнавати пару ліній у випадку більшої різниці у відтінках сірого та проміжку між квадратами. Отже, роздільна здатність – це просторова частота, при якій досягається специфічна контрастність.

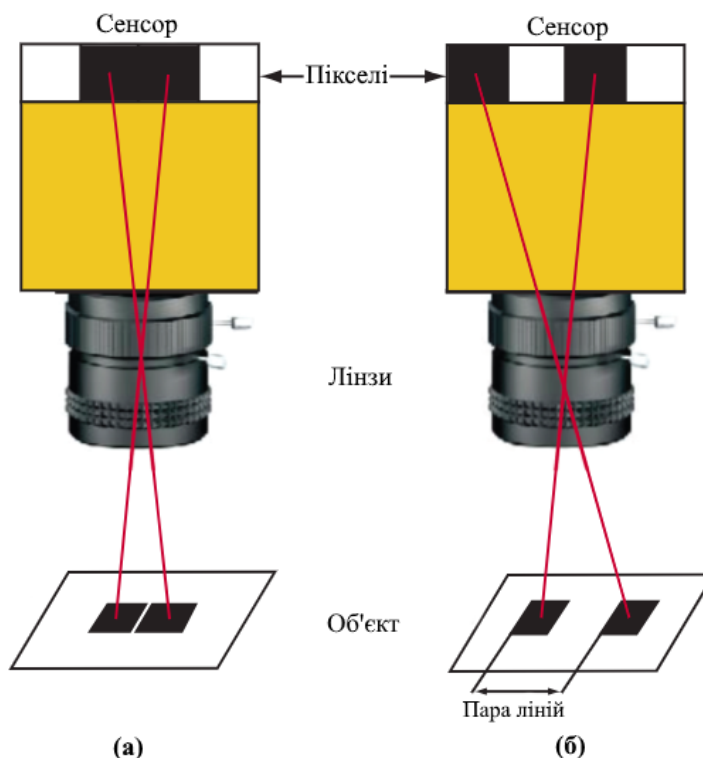


Рисунок 2 – Розділення двох квадратів [1]

Контрастність: Цей параметр визначається як розрізненість між темними та світлими елементами. Зображення з високим контрастом характеризується яскраво вираженою відмінністю між чорними та білими елементами, що підвищує його ясність та визначеність. І навпаки, зображення з низьким контрастом демонструє більш приглушені тони, переважно сірі, зменшуючи це розрізнення. Ця концепція візуально представлена на рис. 3, де перехід від чорного до білого є прикладом високого контрасту, тоді як присутність сірих відтінків вказує на нижчий контраст.

Глибина різкості: Максимальна глибина об'єкта, яку можна повністю підтримувати в прийнятному фокусі. Також є величиною руху об'єкта (в найкращому фокусі та поза ним), яка допустима при збереженні фокусу. Не слід плутати з глибиною фокусу, яка стосується місця, на якому зображення може бути у фокусі сенсора камери [1].

Розмір матриці: Розмір активної області матриці, як правило виражається шириною та висотою. Цей параметр важливий для визначення правильного збільшення лінзи, необхідного для отримання бажаного огляду.

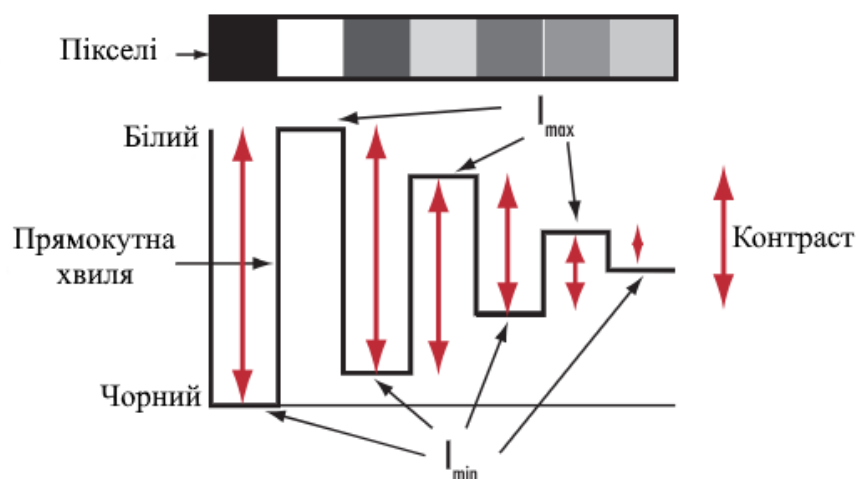


Рисунок 3 – Перехід від чорного до білого є висококонтрастним, тоді як проміжні сірі кольори вказують на нижчий контраст [1]

Розмір пікселя: зазвичай квадратної форми, пікселі складають сітку матриці та мають розмір порядку мікронів (мкм).

Масштабування: збільшення лінзи, що визначається як співвідношення між розміром матриці та полем зору.

1.2 Огляд матриць

1.2.1 Матриці КМОН

Переважає більшість КМОН-матриць складена за тією ж технологією кремнієвих мікросхем, які активно впроваджені в мікропроцесорних системах. Матриці КМОН називають також КМОН сенсорами активних пікселів. Оскільки субмікронні технології КМОН дають можливість впровадження транзисторів у кількості мільйонних порядків на одному кремнієвому чипі, це дало поштовх до розвитку інтеграції численних масивів пікселів, кожен із яких містить власний фотодіод та транзистор зчитування, а також необхідну електроніку для адресації масиву, буферизації аналогового сигналу, цифрового перетворення, обробки та зберігання чи відображення результатів.

Матриці КМОН працюють за низьких напруг порядку від 1,8 В до 5 В, як і інтегральні схеми КМОН. Напряга роботи пристрою залежить від його геометрії та форми виконуваних процесів. Привабливим на споживчих ринках є саме робота за низьких напруг та широка інтеграція, що відповідає вимогам компактності, невисокої вартості виробництва та довгого періоду служби джерел живлення.

Розглянемо будову найпростішого пікселя КМОН-матриці (рис. 4)

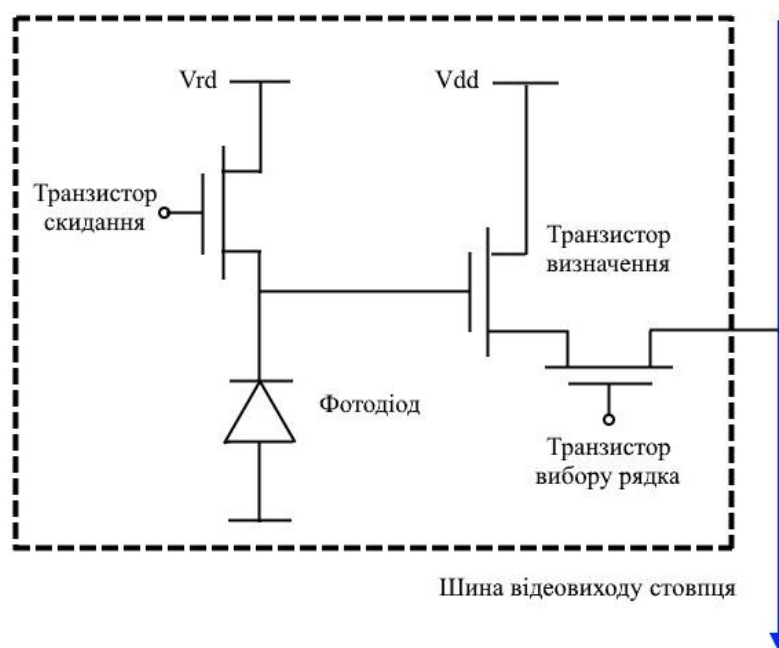


Рисунок 4 – КМОН сенсор активного пікселя 3-транзисторний

Такий піксель містить у своєму складі три транзистори та фотодіод. Призначення транзисторів різне: один – для заряджання фотодіода, другий – для визначення напруги сигналу на фотодіоді, третій – для вибору рядка. Варіації посилення транзистора неминуче призводять до внутрішньої нерівномірності від пікселя до пікселя в масиві [2]. Зазвичай, пікселі адресуються регістрами зсуву, але іноді для забезпечення довільного доступу до пікселів зустрічається і використання адресних декодерів (рис. 5).

Доступ до масиву пікселів матриці КМОН відбувається шляхом вмикання усіх транзисторів вибору рядка в одному рядку пікселів. У нижній частині сукупності окремі пікселі рядка вибираються та зчитуються по стовпцях. А через мультиплексор на аналоговий вихідний підсилювач, масив стовпчасто-паралельних АЦП або на послідовний АЦП може подаватися відеосигнал.

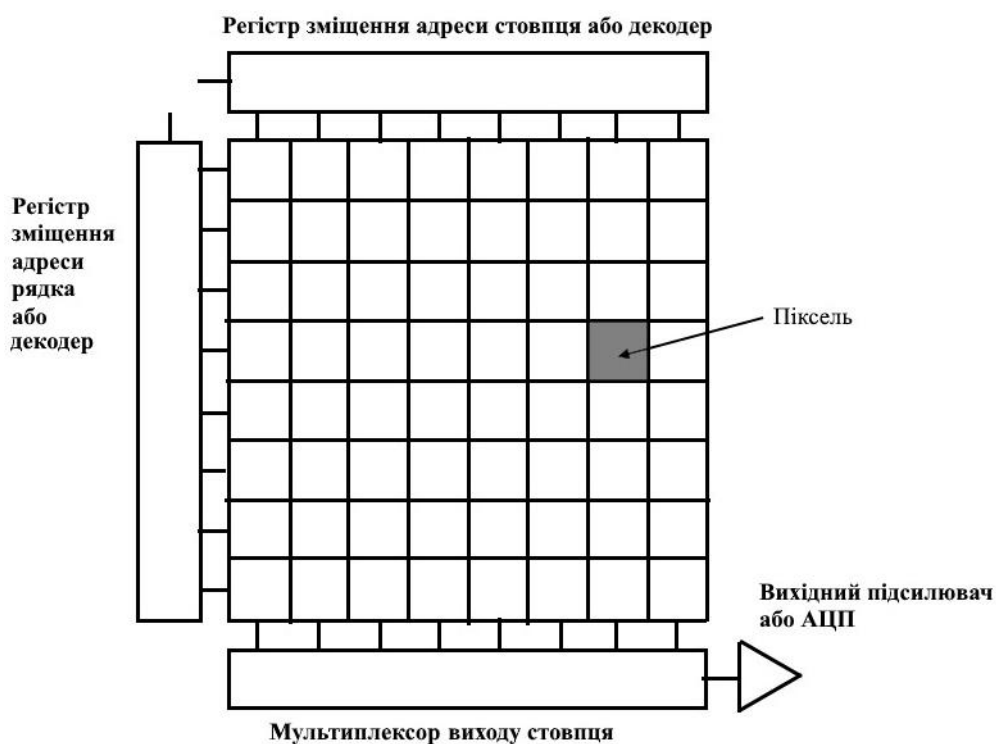


Рисунок 5 – Архітектура масиву

Завдяки інтегрованій електроніці та доріжкам, що виготовленні з алюмінію знижується квантова ефективність матриць КМОН з переднім підсвічуванням. Це обумовлено зменшенням коефіцієнту «заповнення» (англ. fill factor) – параметр, що показує, яка частина площі пікселя фактично чутлива до світлового випромінювання. На прикладі топології типового КМОН-пікселя (рис. 6) розглянемо проблему втрат, що виникають в такій структурі.

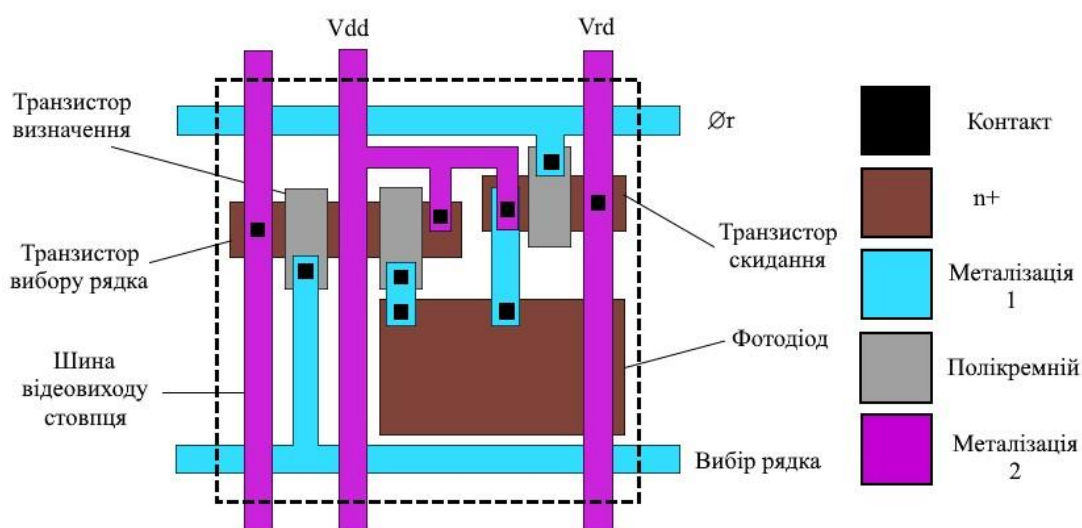


Рисунок 6 – Топологія типового КМОН-пікселя

На рис. 6 продемонстровано, що фотодіод займає всього 19% від площі всього пікселя, для нього характерний коефіцієнт заповнення близько 30%. Подібні втрати спричинені відбиттям світла від алюмінієвих доріжок та індукованих фотонами електронів у підкладці, які поглинаються та втрачаються в піксельних транзисторах. Вирішенням проблеми втрат було виготовлення тонших та задньоосвітлених датчиків. На сьогодні групи вчених вже продемонстрували сенсори, що досягають квантових ефективностей, аналогічних до відповідних ПЗЗ пристроїв.

1.2.2 Матриці ПЗЗ

Пристрої із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) виникли в результаті розробки аналогічних до магнітної «бульбашкової» пам'яті електронних приладів на основі кремнію. Розглядаючи найпростішу структуру ПЗЗ, ми побачимо тут ряд електродів, що розташовані близько один до одного. Під ними лежить напівпровідникова підкладка, від якої електроди відокремлені тонким шаром діелектрика (рис. 7).

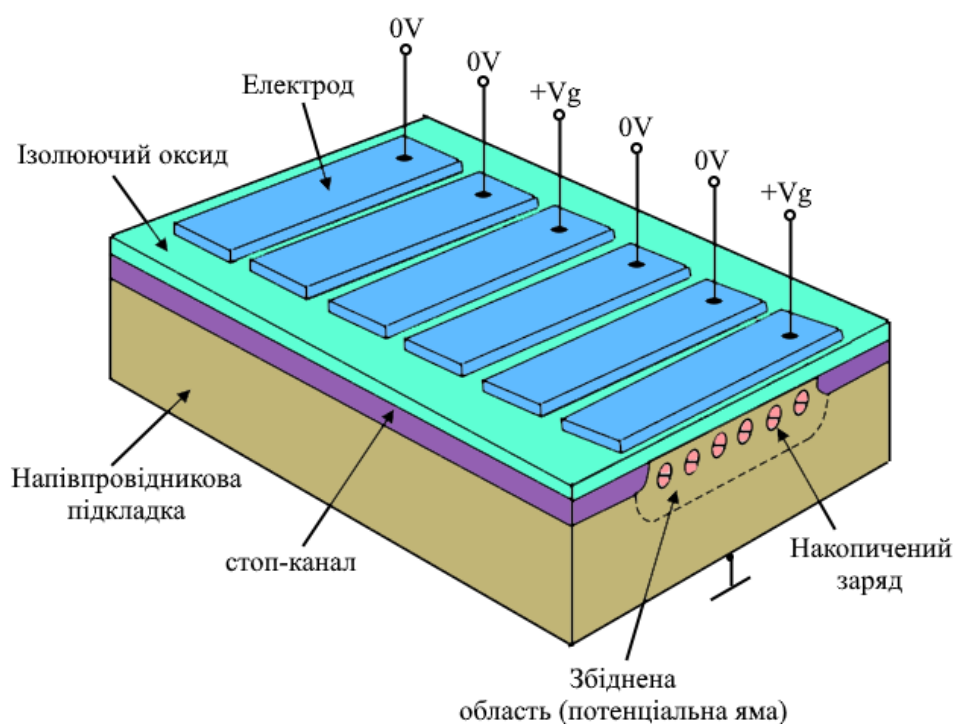


Рисунок 7 – Спрощена структура пристрою із зарядовим зв'язком

Механізм роботи полягає у наступному: під час прикладання напруги зсуву до електрода, у напівпровіднику з'являється збіднена область, яка є потенціальною ямою і може зберігати пакет електричного заряду. Для передачі зарядових пакетів через напівпровідник проводять імпульсацію електродів у заданій послідовності. Потенціальна яма переміщується, а отже переміщуються і її зарядові пакети. Шляхом включення схем вставки та виявлення пакетів заряду у загальну схему можна сформувати реєстр зсуву.

Перевагами ПЗЗ матриць стали компактність, робота за низьких напруг, міцність і просторова лінійність. Оскільки кремній є чутливим до видимого світла матеріалом, то на вершині своєї чутливості ПЗЗ із заднім підсвічуванням може поглинати та сприймати практично усі фотони, що падають на нього. За певних технологічних умов кремній здатний реагувати на м'яке рентгенівське та екстремальне ультрафіолетове випромінювання.

Найпростіша структура ПЗЗ матриці представляє собою масив електродів, які перпендикулярні до ряду ізольованих каналів перенесення заряду. Електроди з'єднані разом у групи з двох, трьох або чотирьох фаз [2]. Фазове зміщення приводить до утворення масивів відокремлених потенціальних ям – пікселів, що збирають електрони, генеровані фотонами. Після здійснення впливу світла, електроди області формування зображення активізуються для послідовної передачі накопиченого заряду вздовж рядків матриці, по одному рядку за цикл. Найнижчий рядок пересувається до послідовного реєстру зчитування, який розташований під прямим кутом до передавальних каналів зони формування зображення або вертикальних стовпців. Цей реєстр прокладається окремо та з більш високою частотою, що уможливорює послідовно зчитувати кожен піксель окремо через підсилювач виявлення зарядів. Після зчитування всього рядка, електроди області формування зображення можуть бути знову імпульсовані задля переміщення наступного рядка зображення до реєстра зчитування. Алгоритм повторюється доти, доки не буде проведено зчитування усіх рядків даного зображення.

Така архітектура має назву повнокадрової матриці ПЗЗ, яка поширена серед наукових, зокрема, астрономічних застосувань. Обмеженням у використанні таких

матриць є розмитість зображення у випадку, коли матриця не закрита під час зчитування. Особливу роль у такому разі відіграє час зчитування кадру. Якщо він займає значну частину часу експозиції, то розмитість зображення буде більшою. У загальному випадку, для вирішення цієї проблеми перед ПЗЗ матрицею встановлюють механічний затвор, оскільки тоді відкривається можливість зчитування інтегрованого зображення за мінімальної освітленості. Альтернативою такому механізму може служити світлоекранований накопичувач, в якому інтегрований зарядовий пакет може передаватися з високою швидкістю по завершенню експозиції. Далі масив зберігання зчитується, доки нове зображення інтегрується в область формування зображення.

Розглянемо підходи щодо конструкції матриць на ПЗЗ. Першими з'явилися ПЗЗ з кадровим перенесенням у вигляді матриць. В таких пристроях присутні світлочутливі сектори накопичення. Їх складають вертикальні ПЗЗ-регістри, кожен з яких відокремлений стоп-каналами. Секція пам'яті, яка має однакову із секцією накопичення структуру та кількість елементів, прилягає до неї.

На кінці області зберігання розташовується ПЗЗ-регістр з горизонтальною орієнтацією. Кількість базових комірок такого регістра відповідає кількості стовпців у областях накопичення заряду та зберігання. Край регістру з горизонтальною орієнтацією оснащений вихідним пристроєм. На область зберігання, вихідний регістр з горизонтальною орієнтацією та вихідний пристрій покривається екран за допомогою алюмінієвого напилення на площину кристалу.

Упродовж часу акумуляції, утворюючи двовимірний масив областей збіднення, на один або декілька електродів області накопичення подається позитивний потенціал. Згенеровані фотонами, носії заряду накопичуються в ближніх областях збіднення, а їх кількість знаходиться у лінійній залежності від інтенсивності експозиції до досягнення межі потенціальної ями.

Під час зворотного проходження кадром, по завершенню періоду акумуляції, на фазові електроди областей накопичення та зберігання подають імпульси для перенесення зарядових пакетів. Двовимірний масив, що накопичився за період перенесення починає зсуватися з області накопичення у область зберігання.

Оскільки число комірок у області зберігання рівне кількості комірок у області накопичення, тоді кожен зарядовий пакет, акумульований у області накопичення буде займати своє місце у області зберігання. Процес накопичення зарядових пакетів відновлюється щойно всі попередні зарядові пакети буде перенесено до області зберігання.

Водночас, у області зберігання під час зворотного проходження по рядку у реєстр з горизонтальною орієнтацією по порядку переміщуються зарядові пакети. На один з електродів реєстру прикладається позитивний потенціал, що сприяє виникненню потенціальної ями, водночас на електроди області зберігання подаються імпульси для паралельного зсуву на один трифазовий елемент масиву зарядових пакетів за напрямком до реєстру з горизонтальною орієнтацією.

Отже, у такий спосіб поточний рядок зарядових пакетів виявляється у реєстрі з горизонтальною орієнтацією, а кожен наступний рядок розміщується в найближчій до реєстру області зберігання.

У момент прямого проходження по рядку через вихідний блок з реєстра з горизонтальною орієнтацією зчитуються зарядові пакети. Для цього на електроди реєстра подаються імпульси переносу. По завершенню зчитування із області зберігання відбувається зсув наступного по порядку рядка, процес відбувається циклічно. По закінченню зчитування рядків з області зберігання, у неї може бути перенесено масив зарядових пакетів, що акумулювався в області накопичення. Накопичення у окремих напівкадрах відбувається під різними фазовими електродами області накопичення для втілення алгоритму черезрядковості.

Серйозним недоліком матриць ПЗЗ з кадровим перенесенням можна вважати вертикальне розмивання від яскравих частин зображення. Світловий потік у момент переміщення масиву зарядових пакетів з області накопичення у область зберігання продовжує продукувати фотоелектрони. Оскільки кожна потенціальна яма проходить через увесь стовпчик світлочутливої області, то вона неодмінно акумулює деяку частину зарядів від усіх точок зображення, що розташовані у поточному стовпці. У реальних зображеннях існують ділянки, рівень освітленості яких не є вищим за середню освітленість спостережуваної сцени. Присутність

таких ділянок призводить до появи вертикальної світлової смуги, яка є продовженням яскравої частини сцени. Рівень вертикального розмиття відповідає освітленості та площі яскравої частини зображення, а також тривалості переміщення зарядів з області накопичення до області зберігання і може перевищувати межу візуального сприйняття. Ефект вертикального розмиття у таких матрицях можна прибрати за допомогою блокування світлового потоку на час переносу механічним затвором.

Перевагами матричних ПЗЗ з кадровим переносом можна вважати зможу впровадження освітлення з боку підкладки, а також широке використання світлочутливої області. Ці переваги забезпечують вражаючий квантовий вихід – близько 98%. Високу чутливість матриці у ближньому ІЧ-діапазоні спектру випромінювання забезпечує унікальна властивість сприймання світла кремнієвою поверхнею. Звідси відкриваються широкі можливості для застосування тепловізійних камер на основі даних матриць для завдань нічного спостереження, зокрема з системою ІЧ-підсвічування.

У галузі охоронного спостереження матричні ПЗЗ із рядковим переносом здобули велику популярність. Для накопичення зарядових пакетів використовують стовпці фотодіодів р-типу зі зворотним зміщенням. Поруч з кожним стовпцем фотодіодів розміщений ПЗЗ-регістр вертикального типу, який не є чутливим до світла та відмежований від фотодіодів фотозатвором. На кінці кожного ПЗЗ-регістру встановлений горизонтальний ПЗЗ-регістр з вихідним блоком.

Усі ПЗЗ-регістри, як вертикальні, так і горизонтальний – захищені від падаючого світла за допомогою екранування.

На фотозатвор подається низький потенціал упродовж накопичення зарядових пакетів у фотодіодах для створення потенціального бар'єру між фотодіодами та ПЗЗ-регістрами вертикального типу.

По завершенню накопичення на фотозатвор тимчасово подається високий потенціал, що дозволяє переміщення зарядових пакетів з фотодіодів до потенціальних ям у вертикальних ПЗЗ-регістрах. Після цього з фотозатвора знімається високий зсув і відновлюється накопичення зарядів у фотодіодах.

Переміщення наступного двовимірного масиву зарядових пакетів з фотодіодів можливе після проходження усіх рядків із зарядовими пакетами.

До переваг матричних ПЗЗ з рядковим переносом можна вважати низький рівень розмивання. Це обумовлено коротким періодом переносу всіх зарядових пакетів в екрановані від світлового випромінювання ПЗЗ-реєстри вертикального типу. Неповне задіяння світлового потоку через наявні нечутливі реєстри вертикального типу є головним недоліком цієї технології.

1.2.3 Алгоритми зчитування сигналу з матриць

Існує велике різноманіття режимів зчитування, однак особливу увагу варто приділити двом з них, а саме: режим рухомого затвору (англ. Rolling shutter) та режим глобального затвору (англ. Global shutter). Якщо ми розглядаємо ПЗЗ з рядковим переносом (рис. 8) у режимі глобального затвору, тут всі пікселі одночасно експонуються в один момент, що є корисним для змінних у кадрі зображень. Але, недолік такого підходу полягає у низькій частоті кадрів. По завершенню експозиції, сигнал з кожного пікселя послідовно перетворюється одним АЦП.

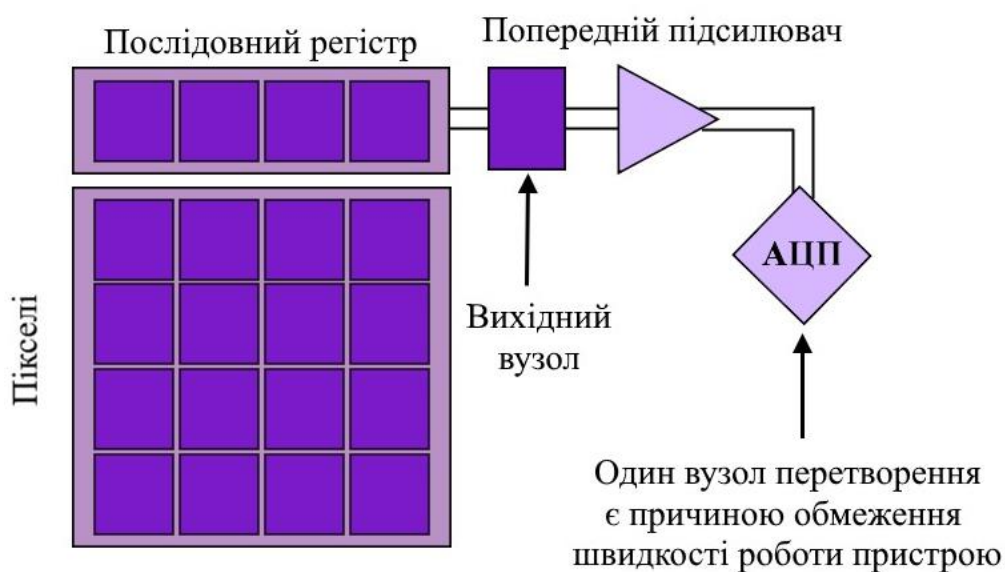


Рисунок 7 – Базова схема зчитування сигналу з ПЗЗ-матриці

Максимальна частота кадрів ПЗЗ-матриці обмежена швидкістю передачі та оцифрування окремих пікселів. Чим більше пікселів передано датчиком, тим нижча загальна частота кадрів камери [3].

Технологія КМОН (рис. 9) пропонує вирішення цієї проблеми впровадженням АЦП для кожного стовпця пікселів, а їх кількість може досягати тисяч. Загальна чисельність пікселів, які оцифровані кожним конвертером, зменшується, що дає коротший час зчитування та вищу частоту кадрів. Проте навіть з багатьма паралельними АЦП, що розподіляють навантаження, масив сенсорів все ще необхідно оцифровувати рядок за рядком, і, як наслідок, маємо незначну затримку між зчитуваннями кожного рядка.

Щоб підвищити частоту кадрів, замість очікування завершення зчитування усього кадру, окремих рядок має змогу почати експозицію чергового кадру після зчитування попереднього. Це прискорює процес, однак затримка між зчитуванням призводить до затримки між початком експозиції кожного рядка, роблячи їх не одночасними.

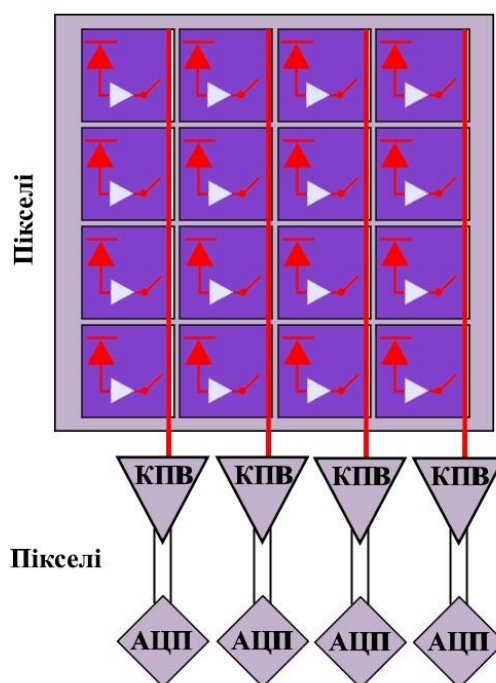


Рисунок 9 – Базова схема зчитування КМОН-матриці

Таким чином, хоча кожен рядок в кадрі експонується за однаковий проміжок часу, початок експонування проходить в різний час, що призводить до накладання експозиції двох кадрів. Кінцева частота кадрів буде залежати від того, з якою

швидкістю завершується зчитування. Такий режим зчитування називається режимом рухомого затвору, схему якого показано на рис. 10.

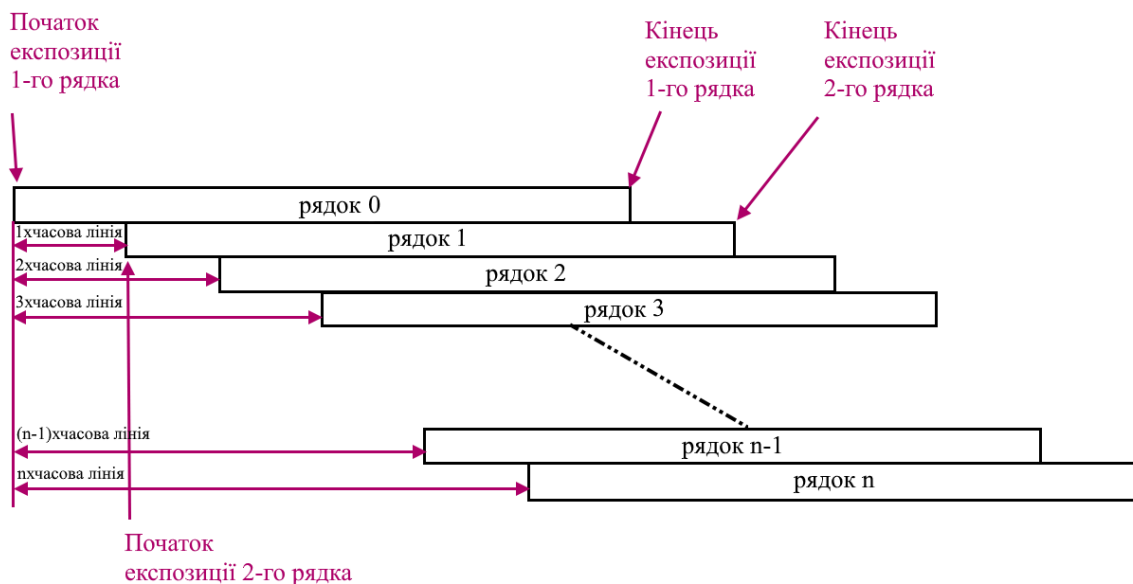


Рисунок 10 – Демонстрація затримки у часі між кожним рядком пікселів матриці КМОН з рухомим затвором у режимі зчитування

Для КМОН-матриці у режимі рухомого затвору частота кадрів тепер визначається швидкістю АЦП (тактова частота) і кількістю рядків на сенсорі. Наприклад, QImaging optiMOS – це sCMOS-камера, яка має комбіновану швидкість АЦП 283 МГц із 1080 рядками пікселів. При такій тактовій частоті час зчитування одного рядка і, отже, затримка між двома сусідніми рядками становить приблизно 8,7 мкс. З 1080 рядками затримка початку експозиції та часу зчитування від верхньої частини кадру до нижньої становить приблизно 10 мс. Це також відповідає максимальній частоті кадрів 100 кадрів за секунду (fps) і мінімальній часовій роздільній здатності 10 мс (у повному кадрі) [3].

1.3 Принципи роботи інфрачервоного підсвічування

Переважна більшість сучасних камер здатні фіксувати зображення, використовуючи як звичне для людського ока видиме світло, так і ближнє інфрачервоне (ІЧ) випромінювання. Якщо освітлити сцену за допомогою штучного ІЧ-освітлення, можна отримати високоякісне зображення навіть у абсолютній темряві.

Розглянемо, які фундаментальні явища лежать у роботі ІЧ-підсвічування. Отже, світло формується з дискретних енергетичних частинок – фотонів. Камера оснащена сенсором зображення, що складається з чутливих до світла елементів – пікселів. Їх кількість на одній матриці досягає мільйонних порядків.

Світло відрізняється за енергією та довжиною хвилі (рис. 11). Спроможність сенсора камери розпізнавати частинки світла залежить від довжини хвилі, на якій вони випромінюють світло. Зазвичай камери здатні виявляти випромінювання у діапазоні від ~ 400 нм до ~ 700 нм, однак існує можливість детектувати світлове випромінювання у більш ширшому діапазоні спектру випромінювання – порядку від 700 нм до 1,5 мкм. Тобто у ближньому інфрачервоному діапазоні хвиль.

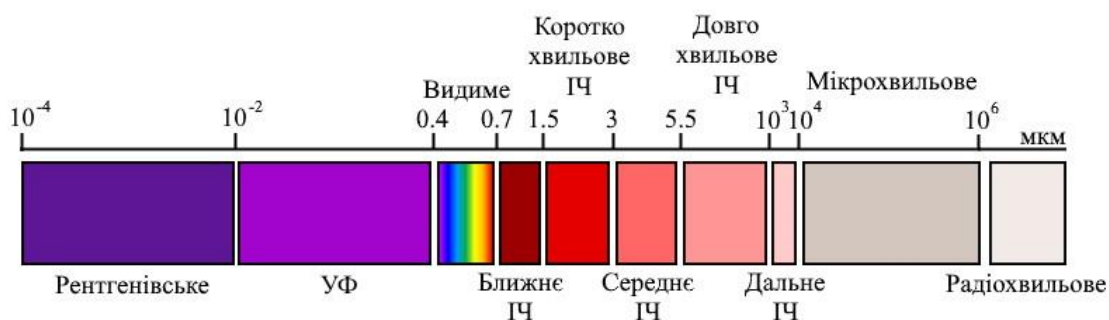


Рисунок 11 – Спектр електромагнітного випромінювання

Оскільки пристрої реєстрації зображення, зокрема матриці фото- відеокамер, здатні вловлювати світлове випромінювання у ІЧ-діапазоні, то існує проблема випромінювання ІЧ-світла об'єктами, за якими проводиться спостереження в умовах низької освітленості. Для вирішення цього питання використовують зовнішнє або активне ІЧ-підсвічування.

Інфрачервоне (ІЧ) підсвічування та візуалізація базуються на використанні ІЧ-випромінювачів для освітлення сцени в ІЧ-спектрі та застосуванні ІЧ-камер для

збору зображень, використовуючи ІЧ-випромінювання. Ключові особливості ІЧ-камер включають роздільну здатність, яка визначає щільність пікселів у зображенні, діафрагму, що регулює кут огляду камери, чутливість до мінімального світлового потоку, який можна зафіксувати, та частоту кадрів.

Процес отримання зображень за допомогою ІЧ-підсвічування включає в себе використання ІЧ-випромінювачів, що випускають інфрачервоне світло, невидиме для людини, та ІЧ-приймачів, які перетворюють це світло на електричний сигнал для подальшої обробки і створення зображення. Ця технологія знаходить широке застосування у таких галузях, як системи безпеки, нічні камери фото- та відеоспостереження та інших умовах з низьким рівнем освітлення.

1.3.1 Режими інфрачервоного підсвічування

Зазвичай у матрицях КМОН використовують режим рухомого затвору. Це має свої переваги, про які ми згадували раніше, однак і вводить певні труднощі з виведенням кінцевого зображення. Режим рухомого затвору вводить затворні артефакти у кінцеве зображення (рис. 12) під час інтеграції пікселів по кожному рядку. Це, насамперед, пов'язано з особливістю механізму обробки зображення КМОН-матрицями.

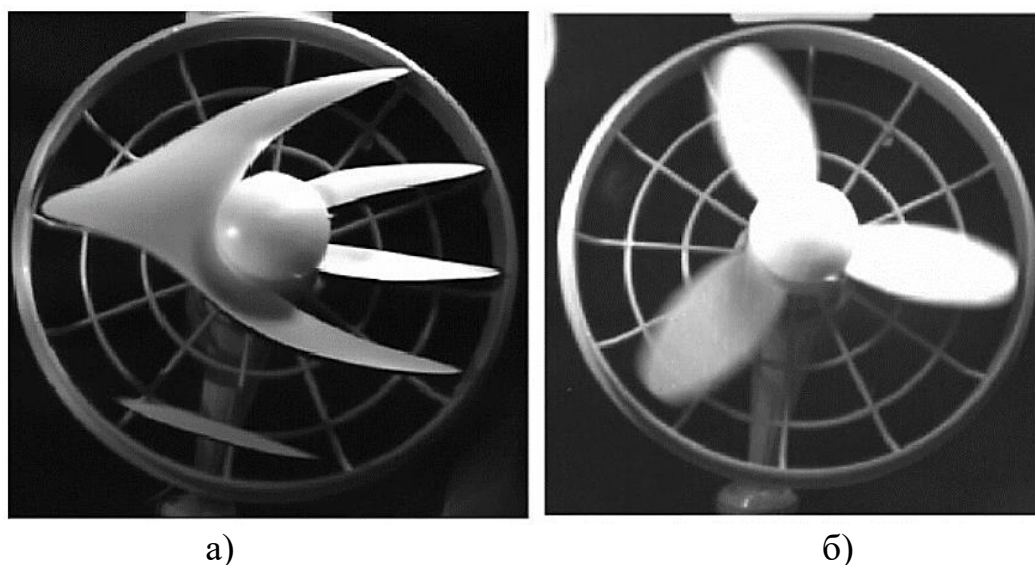


Рисунок 12 – Артефакти режиму рухомого затвору (а) у порівнянні з режимом глобального затвору (б) [10]

Затримка між зчитуванням різних ліній змушує лінії інтегрувати світло (збирати фотони) у дещо інший час (приблизно 14,82 мкс при 60 к/с FullHD), що зрештою створить артефакт рухомих затворів [9]. У разі, коли охоплювані об'єкти швидші, описане явище буде яскравіше вираженим. Також, режим рухомого затвору вводить деякі обмеження на синхронізацію ІЧ-підсвічування з сигналом обробленого зображення (рис. 13). Упродовж часу інтеграції зображення кожен рядок матриці акумулює світло протягом однакового періоду часу.

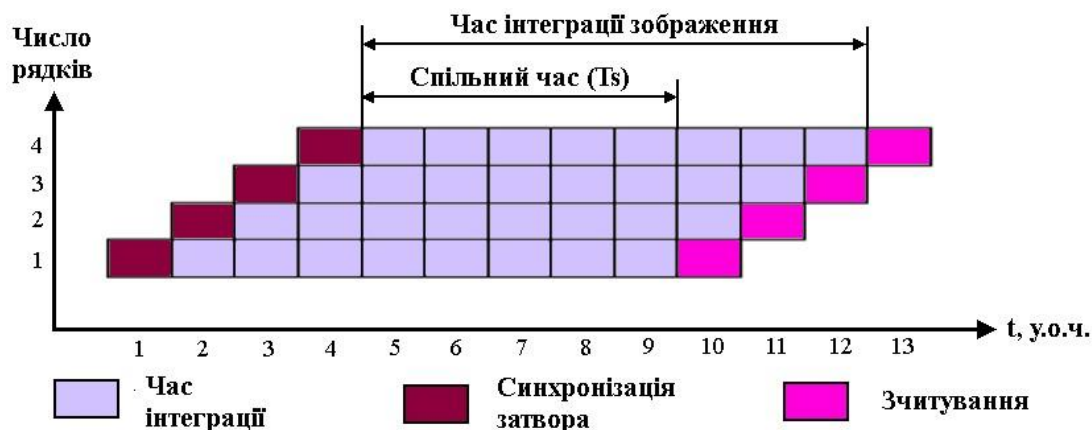


Рисунок 13 – Часова діаграма режиму рухомого затвора

У режимі постійного ІЧ-підсвічування випромінювач буде діяльним протягом усього часу інтеграції. Це гарантує одержання однакової кількості світла кожним рядком матриці незалежно від руху об'єктів. В режимі модуляції ІЧ світла випромінювач буде працювати з деяким періодом, чергуючи стани ввімк./вимк.

Це створює два ефекти (рис. 14): градієнт інтенсивності, коли верхні рядки отримують більше світла, і змінне розмиття при русі, коли довша модуляція спричиняє більше розмиття для швидко рухомих об'єктів.

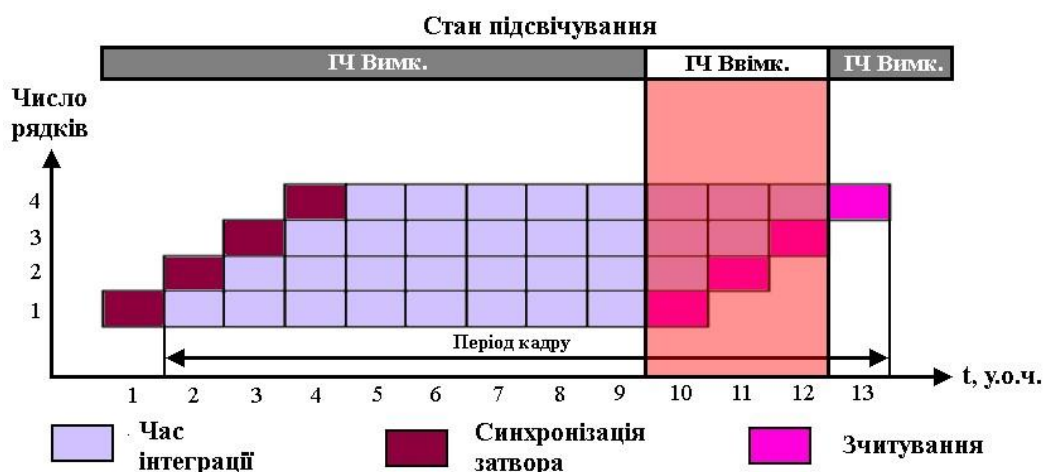


Рисунок 14 – Часова діаграма несинхронізованої модуляції ІЧ-підсвічування

Задля уникнення цих ефектів існують різні режими модуляції ІЧ-світла, які полягають у перекритті періоду модуляції світла з часом інтегрування кожного рядка. Розглянемо два таких режими: повнокадрова модуляція (англ. Whole-frame strobing – WFS) та модуляція спільного часу (англ. Shared-time strobing – STS).

1.3.2 Повнокадрова модуляція світла

Принцип роботи даного режиму підсвічування полягає у вимиканні ІЧ-випромінювача в моменти, коли жоден рядок не зайнятий інтеграцією матриці. Це не впливає на якість зображення, оскільки працює так само, як і постійне ІЧ-випромінювання під час інтеграції. Енергія економиться за рахунок вимкнення ІЧ-світла, знижуючи середнє споживання електричної енергії. Інтеграція відбувається лише протягом певного часового вікна, дозволяючи вимкнути ІЧ-світло після цього часу і до наступної інтеграції (рис. 15).

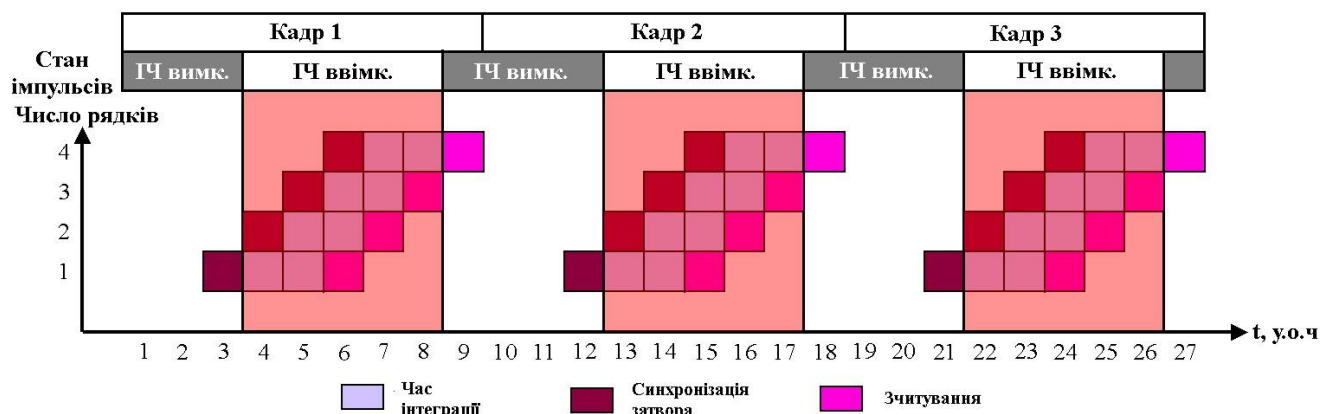


Рисунок 15 – Часова діаграма режиму повнокадрової модуляції

Мінімальний період модульованого підсвічування буде визначатися виразом:

$$T_{ON}^{\min} = T_i + (N_{\text{дійсн}} - 1) \quad (1)$$

де T_{ON}^{\min} – мінімальний період підсвічування, T_i – період інтеграції, $N_{\text{дійсн}}$ – кількість дійсних рядків матриці.

У порівнянні з порожніми рядками, що існують для пояснення синхронізації матриці, дійсні рядки містять інформацію про зображення.

Середня споживана потужність такої системи підсвічування буде визначатися як:

$$P_{сер} = \frac{T_{ON} \cdot P_{LED}}{T_K} \quad (2)$$

де T_{ON} – період підсвічування, P_{LED} – потужність випромінювача, T_K – період кадру.

Зростання кількості дійсних рядків приводить до збільшення часу інтеграції. Це обмежує можливість переходу в стан вимкнення через наближення до попереднього кадру. В результаті система повертається до режиму постійного ГЧ-підсвічування. Це явище можна спостерігати за умови використання довшого періоду інтеграції. Відповідно, зменшується час, протягом якого система може перебувати у вимкненому стані між кадрами, що обмежує можливості для економії енергії.

1.3.3 Модуляція за спільним часом

Іншим методом для налаштування модульованих імпульсів є модуляція за спільним часом (рис. 16), яка ґрунтується на тому, що період інтегрування відносно довгий для забезпечення однакового періоду інтеграції для всіх рядків.

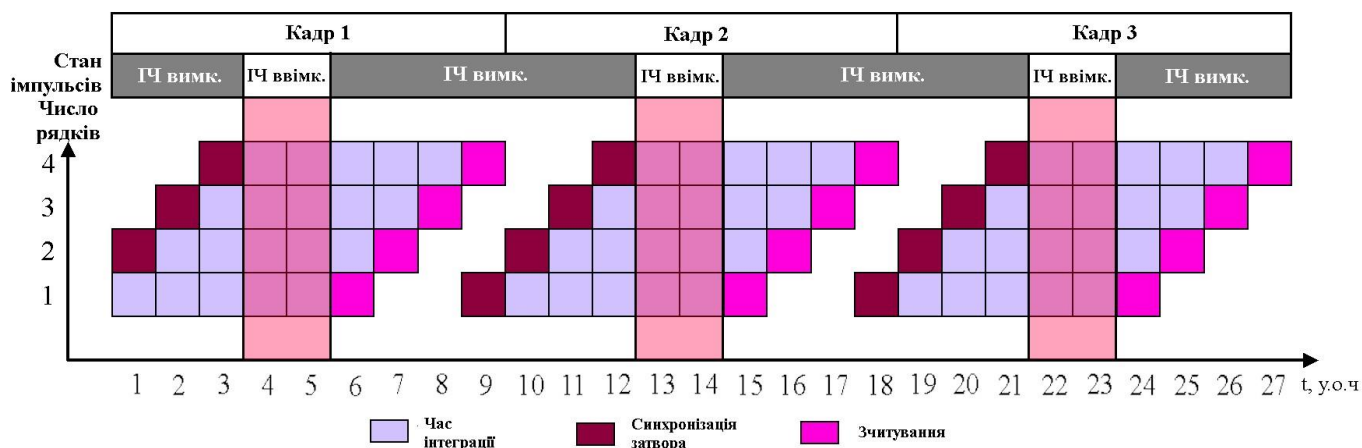


Рисунок 16 – Часова діаграма модуляції за спільним часом

Відмінною особливістю цього режиму є його вища ефективність у порівнянні з повнокадровим режимом, а також гарантоване отримання світла від ГЧ-випромінювача при його ввімкненні. Цей метод також усуває артефакти рухомого затвора, створюючи віртуальний глобальний затвор. Однак мінімальні вимоги до

періоду інтеграції можуть бути значними у порівнянні з періодом модульованого імпульсу.

Мінімальний період інтеграції можна розрахувати за формулою:

$$T_i^{\min} = T_{\text{ON}} + (N_{\text{дійсн}} - 1) \quad (3)$$

З формули (3) бачимо, що мінімальний період інтеграції сильно залежний від кількості дійсних рядків матриці.

Якщо використовується Full-HD сенсор із 1080 рядками, кінцевий мінімальний період інтеграції дорівнює 1082. Для великого періоду підсвічування цей метод буде несприятливим, оскільки T_i^{\min} буде дуже великим і матиме тенденцію зростати за межі доступного періоду кадру [10]. Крім того, занадто велике значення періоду підсвічування змусить систему діяти у режимі постійного ГЧ-підсвічування, і значних поліпшень від цієї техніки не можна очікувати при коротких періодах підсвічування.

1.4 Спектральні характеристики кремнієвих фотоприймачів

Окрему увагу варто приділити спектральним характеристикам фотоприймачів та фотовипромінювачів, оскільки вони відіграють основоположну роль у формуванні ГЧ-зображення.

Фотоприймачі є фундаментальними складовими у системах зчитування оптичних сигналів, так як вони здійснюють перетворення частинок світла на електричний сигнал. На сьогодні відомо багато типів фотоприймачів, які володіють унікальними властивостями, що визначають їх функціональність та продуктивність.

Для фотоприймачів важливим параметром є квантова ефективність. Вона визначає імовірність генерації носіїв заряду у фотоприймачі у відповідь на падаючий на площину приймача фотон. Існує зовнішня та внутрішня квантова ефективність.

Внутрішня квантова ефективність визначає відсоток фотонів, які взаємодіють з активною областю приймача і ефективно генерують електронно -

діркові пари всередині напівпровідника. Цей параметр відображає внутрішню ефективність перетворення фотонів у заряди і не бере до уваги будь-які втрати, що виникають до того, як фотони досягають активної області приймача.

Зовнішня квантова ефективність враховує не тільки внутрішню ефективність перетворення фотонів у електричний заряд, але й втрати, що пов'язані з відбиванням, поглинанням або розсіюванням фотонів, які не доходять до активної області приймача. Цей параметр показує відсоток фотонів, які входять до фотоприймача і ефективно генерують електронно-діркові пари, враховуючи всі зовнішні фактори, які можуть вплинути на поглинання фотонів. Він може визначатися відношенням кількості носіїв заряду, що були згенеровані внаслідок опромінення, до кількості фотонів, що падають на площину приймача:

$$\eta_e = \frac{n_{np}}{n_\gamma} \quad (4)$$

де n_{np} – кількість електронно-діркових пар, згенерованих внаслідок опромінення, n_γ – кількість фотонів, що падають на поверхню фотоприймача.

Також зовнішню квантову ефективність можна виразити через фотострум та оптичну потужність:

$$\eta_e = \frac{h\nu \cdot I_\Phi}{e \cdot P_s} \quad (5)$$

де $h\nu$ – квант світла, звідки h – стала Планка і $h = 4,135 \cdot 10^{-15}$ еВ·с; ν – лінійна частота світлової хвилі; I_Φ – фотострум; e – елементарний заряд і $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл; P_s – потужність вихідного сигналу.

Ключовими характеристиками фотоприймача є швидкість відгуку, шуми, спектральна чутливість, динамічний діапазон, чутливість.

Спектральна чутливість визначає діапазон спектру випромінювання, в якому здатний сприймати фотоприймач. Залежно від довжини хвилі, на яку реагує фотоприймач, він може виявляти сигнали лише у визначеному діапазоні електромагнітного спектру. Матеріал та конструкція фотоприймача визначають його спектральну чутливість.

Частотні характеристики фотоприймачів є визначальним фактором для швидкості відгуку – здатності відстежувати оптичний сигнал, що швидко змінюється у часі. Фотоприймач має володіти високою швидкістю, яка має бути порівняно вищою за швидкість зміни сигналу в часі для точної фіксації оптичного сигналу. Аналогічно, для цього фотоприймач може також володіти частотною характеристикою з достатньою смугою пропускання, щоб охопити якомога більший діапазон частот сигналу.

В часовій області швидкість фотоприймача характеризується часом наростання t_r та часом спадання t_f відгуку на імпульсний (рис. 17 – а) або на прямокутний імпульсний (рис. 17 –б) сигнали [4].

Час наростання визначається як інтервал часу для підвищення відгуку від 10% до 90% від його пікового значення, тоді як час спадання визначається як інтервал часу для відгуку до зниження від 90% до 10% від максимальної амплітуди сигналу. Як правило, загальна швидкість фотоприймача визначається як його внутрішньою смугою пропускання, так і смугою пропускання, обмеженою RC-схемою. Час наростання імпульсного відгуку визначається власною смугою пропускання, а час наростання прямокутного імпульсу визначається смугою пропускання фотоприймача, обмеженого RC-схемою. [4].

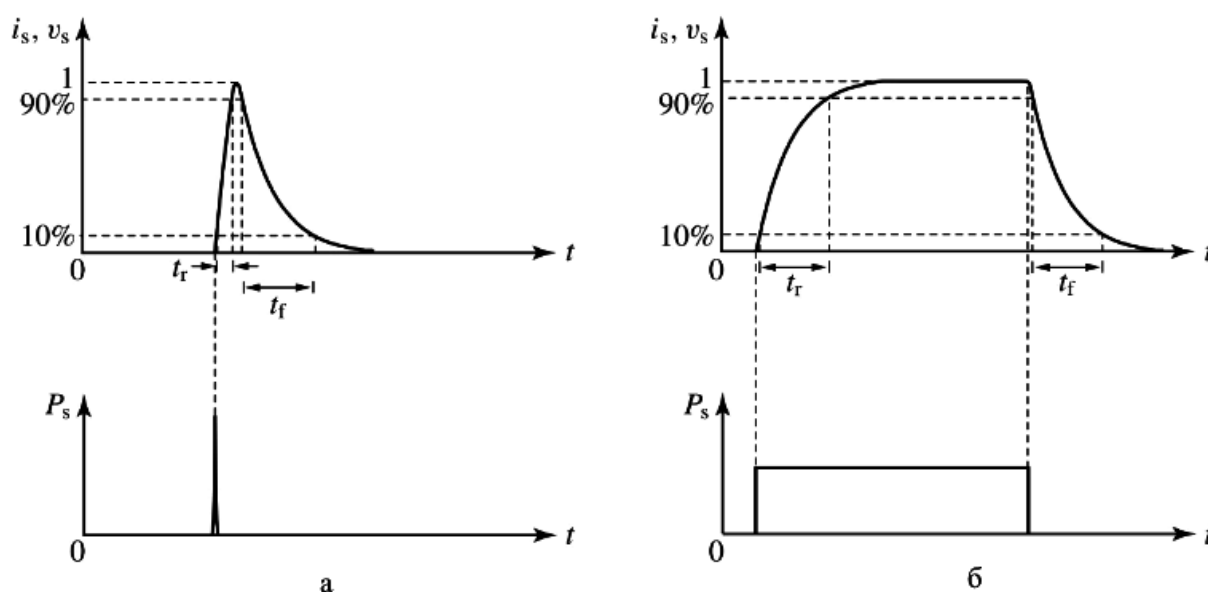


Рисунок 17 – Типова відповідь фотоприймача на: а) – імпульсний сигнал, б) – прямокутний імпульсний сигнал [4]

Чутливість фотоприймача представляє собою показник, який описує величину електричного сигналу, що генерується у відповідь на опромінення світловими хвилями. Вона дозволяє оцінити, який вихідний сигнал може бути отриманий приймачем за певного рівня вхідного оптичного сигналу. Значення чутливості варіюється у залежності від матеріалу, з якого виготовлено фотоприймач, його конструкції та довжини хвилі випромінювання. Параметр можна виразити як відношення вихідного струму або напруги до потужності вхідного оптичного сигналу:

$$R = \frac{I_{\Phi}}{P} \quad (6)$$

де R – чутливість фотоприймача, [А/Вт]; P – потужність вхідного оптичного сигналу.

Ця величина характеризує ефективність трансформації потужності світла у електричний сигнал і залежить від довжини хвилі світлового випромінювання, що потрапляє на приймач, від температури та зворотного зміщення, яке прикладене до фотодіода.

Існує багато різних типів фотоприймачів, які працюють за різними принципами. До найпоширеніших типів фотоприймачів належать:

- фотодіоди – це напівпровідникові пристрої, які використовують фотоелектричний ефект для перетворення світла в електричний сигнал. Фотодіоди є одними з найпоширеніших типів фотоприймачів і використовуються в широкому спектрі застосувань;

- фоторезистори – це резистори, опір яких змінюється під дією світла. Фоторезистори використовуються в таких застосуваннях, як освітлення, сенсори руху, тощо;

- фоторезистивні плівки - це тонкі плівки, які змінюють свою електричну провідність під дією світла. Вони використовуються в різних галузях, включаючи виготовлення друкованих плат, мікроелектроніку та оптику;

– фотоелементи – це пристрої, які перетворюють світлове випромінювання в електричну енергію. Вони працюють на основі фотоелектричного ефекту, який полягає в тому, що світло викликає вивільнення носіїв заряду з речовини;

– фототранзистори – це транзистори, які не лише керуються електричним струмом, а й чутливі до світлового випромінювання. Вони працюють за принципом внутрішнього фотоелектричного ефекту і поєднують в собі властивості як звичайних транзисторів, так і фотоелементів, тож виконують перетворення світлових сигналів в електричні з одночасним підсиленням останніх.

Розглянемо детальніше пристрій, що безпосередньо використовується у матрицях фото- та відеокамер для реєстрації зображень, а саме фотодіоди. Принцип роботи цих пристроїв заснований на розділенні фотоносіїв заряду, які генеруються під впливом світлового випромінювання за допомогою електричного поля р-п переходу. Фотодіоди бувають різних типів та конструкцій, однак основні з них – діоди з р-п переходом, р-і-п діоди, діоди зі структурою метал-напівпровідник (так звані діоди з бар'єром Шоттки), а також діоди з гетеропереходом. Детальний опис кожного з них не є задачею нашої роботи, тому подальші міркування стосуються загального визначення фотодіода, як пристрою перетворення світлового випромінювання у електричний сигнал.

На рис. 18 зображено структуру фотодіода. Через прозоре захисне вікно на напівпровідниковий матеріал падають пучки світлового випромінювання Φ .

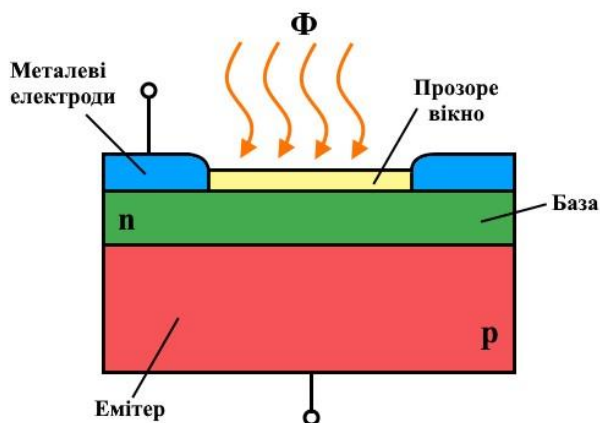


Рисунок 18 – Структура фотодіода

Задля ефективного функціонування фотодіода товщина n-шару повинна бути меншою за глибину поглинання χ . Режим зворотного зміщення є переважним для

фотодіода. У разі відсутності світлового випромінювання через фотодіод протікає зворотний струм, відомий як темновий струм I_T . Утворення пар фотоносіїв – електронно-діркової пари у р-п переході та суміжних областях відбувається внаслідок дії квантів світла.

Електричне поле р-п переходу відокремлює фотоносії, пересуваючи електрони в n-область і дірки в р-область, тим самим створюючи додатковий зворотний струм у діоді, відомий як фотострум I_Φ . Фотострум формується завдяки участі як дірок і електронів, що генеруються безпосередньо в р-п переході, так і неосновних носіїв заряду з областей р та n, які виникають біля переходу, але не далі ніж на дифузійну довжину.

У протилежному випадку під час дифузії до р-п переходу дірки та електрони не доходять, оскільки встигають прорекомбінувати. Основні носії заряду затримуються полем переходу в своїх ділянках. Загальний струм фотодіода дорівнює сумі темного струму та фотоструму [5]:

$$I = I_\Phi + I_T \quad (7)$$

Розглянемо деякі важливі характеристики фотодіода, зокрема, світлову та спектральну. Світлова характеристика (рис. 19) виражається залежністю фотоструму діода від світлового потоку за постійної зворотної напруги $I_\Phi = f(\Phi) \Big|_{U_{зв} = \text{const}}$. Світлова характеристика лінійна в широкому діапазоні зміни світлового потоку [5].

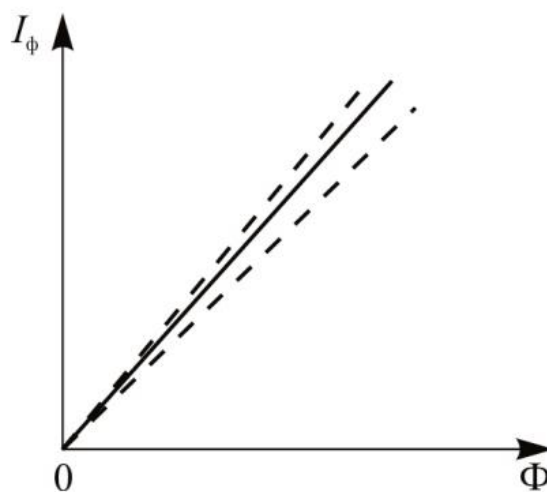


Рисунок 19 – Світлові характеристики фотодіода [5]

Це викликано малою товщиною бази фотодіода у порівнянні з дифузійною довжиною фотоносіїв. Отже усі неосновні носії заряд, які генеруються в базі під впливом світлового потоку, досягають р-n переходу і створюють фотострум. Втрати на рекомбінацію неосновних носіїв не залежать від світлового випромінювання, оскільки вихідний матеріал фотодіода має низький вміст домішок, що формують рекомбінаційні центри. При різних зворотних напругах світлові характеристики майже ідентичні, адже зворотний струм фотодіода при $\Phi > 0$ слабо залежний від прикладеної напруги.

Спектральна характеристика відображає зміну фотоструму в залежності від довжини падаючого на фотодіод світлового випромінювання. При значних довжинах хвиль енергія фотонів є низькою у порівнянні з шириною забороненої зони напівпровідника, що недостатньо для переміщення електронів з валентної зони у зону провідності, через що фотострум відсутній. Зі зменшенням довжини хвилі падаючого світла фотострум починає зростати і досягає свого піку – на спектральній характеристиці спостерігаються максимуми, які, в залежності від ширини забороненої зони, можуть знаходитись на різних ділянках спектру випромінювання.

Подальше зменшення довжини хвилі призводить до підвищення показника поглинання, що у свою чергу призводить до зменшення глибини поглинання χ . Внаслідок цього утворення фотоносіїв відбувається близько біля світлочутливої поверхні, що сприяє зростанню впливу поверхневої рекомбінації та зменшенню тривалості життя надмірних носіїв заряду. Тому на спектральній характеристиці ми спостерігаємо зменшення фотоструму при зменшенні довжини хвилі світлового випромінювання.

Розглянемо типову спектральну характеристику чутливості для фотодіода на основі кремнію на рис. 20:

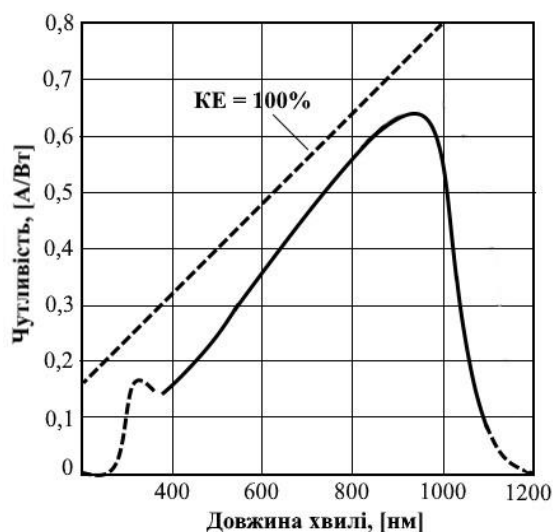


Рисунок 20 – Типова спектральна характеристика чутливості кремнієвого p-i-n фотодіода

Як бачимо, максимум спектральної чутливості спостерігається у ближньому ІЧ-діапазоні, що говорить про доцільність розгляду кремнієвих фотодіодів у пристроях реєстрації ІЧ зображення. За допомогою різних технологічних підходів до виготовлення фотодіодів існує можливість переміщувати екстремум цієї характеристики уздовж спектру, виходячи з технологічних та комерційних вимог до такого фотодіода.

Дослідимо вплив дифузійного шару на чутливість фотодіода. Розглянемо Si за температури 25°C. Енергія забороненої зони в такому випадку буде становити 1,12 eV, а гранична довжина хвилі рівна 1100 нм. У короткохвильовому діапазоні рівень поглинання дифузійним шаром світлового випромінювання підвищується на порядки. Це означає, що чутливість фотодіода буде вищою у випадку близького розташування p-n переходу до поверхні та тонкого дифузійного шару.

Оскільки кремній має великий коефіцієнт поглинання світла у видимій та ультрафіолетовій області, навіть фотодіод з тонкої пластини може достатньою мірою виявляти світло в цих областях. Однак у ближньому інфрачервоному діапазоні коефіцієнт поглинання світла стає надзвичайно низьким і пропускає більше світла, що знижує чутливість. Щоб досягти високої чутливості кремнію в ближньому ІЧ-діапазоні, шар поглинання світла можна було б зробити товщим, використовуючи більш товсту кремнієву пластинку, але це спричиняє такі

проблеми, як потреба у високій напрузі живлення, збільшенні темного струму та зниженій швидкості відгуку [6].

Вирішення такої проблеми знайшлась у підході компанії Hamamatsu, яка використовує спеціальну мікрообробку задньої поверхні, аби отримати високі значення чутливості в ближньому ІЧ-діапазоні спектру випромінювання. Прикладом використання такої технології може служити наступне: якщо до кремнієвого фотодіода, у якого на довжині хвилі 1,06 мкм квантова ефективність становить 25%, застосувати даний технологічний підхід, то спостерігається збільшення квантової ефективності приблизно у 3 рази – 72%. Така технологія дає можливість для виготовлення фотодіодів з високою швидкістю та чутливістю в ближньому ІЧ-діапазоні, чого було важко досягнути у минулому.

1.5 Спектральні характеристики комерційних випромінювачів на ближній інфрачервоний діапазон

Світловипромінювачами є пристрої, що здатні перетворювати електричну енергію в оптичне випромінювання. Робота таких приладів супроводжується явищем люмінесценції – вид світлового випромінювання, під час якого його інтенсивність вища, аніж теплове випромінювання при певній температурі і триває значно довше, аніж період коливань світла після зупинки збуджуючого впливу. Це явище базується на квантових переходах частинок у нормальний стан зі збудженого, а саме з вищого енергетичного рівня до нижчого. Випромінювачі з напівпровідників керуються явищем електролюмінесценції.

Фотовипромінювачами можуть бути світлодіоди (англ. Light Emitting Diode – LED), лазери, тощо. Огляд лазерів у даній роботі не передбачено, тому ми детальніше зупинимось на світлодіодах.

Світлодіод – це напівпровідниковий прилад некогерентного випромінювання в оптичному діапазоні довжин хвиль, принцип дії якого ґрунтується на явищі електролюмінесценції в напівпровідниках і призначений для роботи в пристроях відображення інформації, оптопарах і у волоконно-оптичних лініях зв'язку.

Світлодіоди можуть утворюватися на основі р-п переходів, переходів метал-напівпровідник і гетеропереходів [5].

У LED-діодах електролюмінесценція може бути спричинена збудженням через лавинне помноження носіїв заряду в р-п переході та через тунелювання носіїв крізь р-п перехід при прямому та зворотному зміщенні. Однак у світлодіодах переважно використовується інжекційне збудження для стимуляції люмінесценції. При прямому зміщенні р-п переходу у р та n областях інжектуються значні кількості неосновних носіїв, які перебувають у збудженому стані та активно рекомбінують.

На даний час виробництво світлодіодів спеціалізується на пристроях, що покривають увесь діапазон довжин хвиль видимого світла. Однак, існують світлодіоди, які здатні випромінювати в оптичному діапазоні, що виходить за межі видимого, зокрема, ІЧ-світлодіоди. Вони виготовляються з напівпровідникових матеріалів, у яких ширина забороненої зони буде меншою від 1,5 еВ. Найбільш корисними для виробництва є сполуки GaAs та $Ga_{1-x}Al_xAs$.

До основних характеристик світлодіодів можна віднести випромінювальну, спектральну та вольт-амперну характеристики, а також діаграму напрямленості.

Випромінювальна характеристика $\Phi_e = f(I_{пр})$ виражає зміну потоку випромінювання в залежності від струму прямого зміщення світлодіода (рис. 21). Вона лінійна протягом широкого діапазону зміни струму.

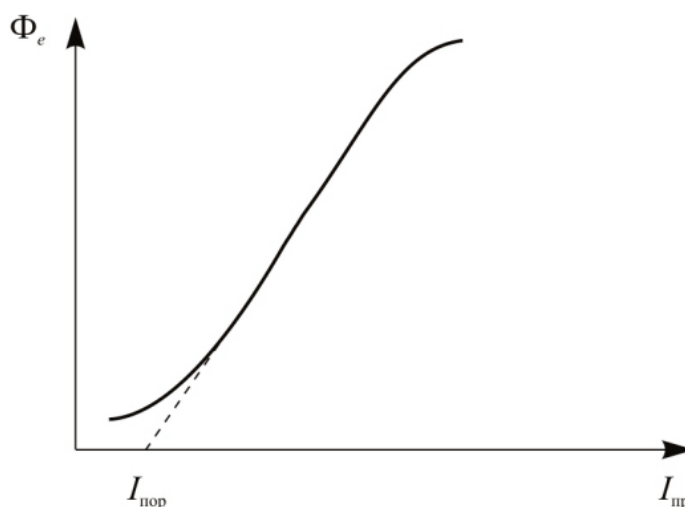


Рисунок 21 – Випромінювальна характеристика світлодіода [5]

За малих струмів прямого зміщення спостерігається невисока ефективність випромінювання, яку можна пояснити переважаючим впливом безвипромінювальної рекомбінації на поверхні та в зоні об'ємного заряду переходу. Збільшення струму приводить до заповнення центрів рекомбінації, тому їх вплив зменшується. У області великого струму залежність набуває сублінійного характеру через насичення інтенсивності світлового потоку. Це відбувається внаслідок заповнення центрів випромінювальної рекомбінації при високих струмах.

Спектральна характеристика світлодіода $\Phi_e = f(\lambda)$ (рис. 22) виражає зміну світлового потоку зі зміною довжини хвилі оптичного випромінювання.

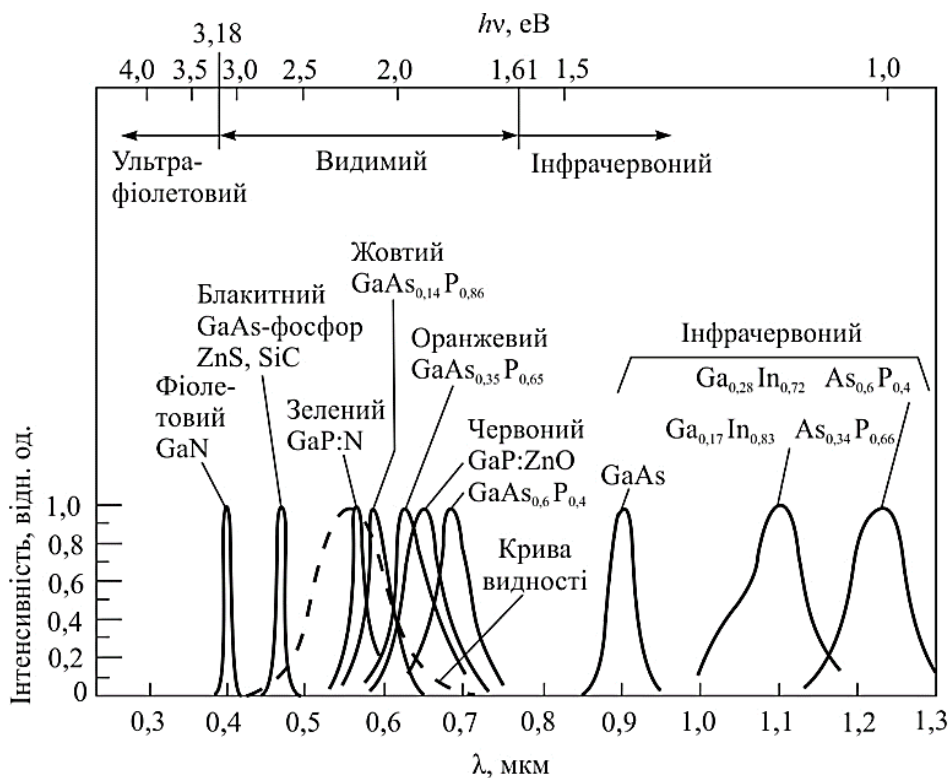


Рисунок 22 – Спектри випромінювання світлодіодів на основі різних матеріалів [5]

За цією характеристикою визначається колір, який буде випромінювати світлодіод.

Діаграмою направленості $I_V = f(\Theta)$ називають залежність між силою кольору та напрямком випромінювання. Геометрія випромінювача впливає на форму такої діаграми (рис. 23).

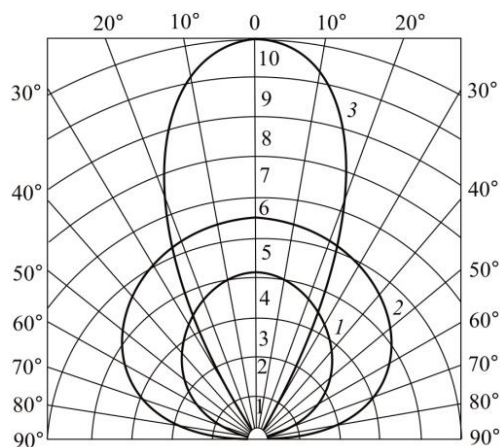


Рисунок 23 – Діаграма направленості різних конструкцій світлодіодів: 1 – плоскої; 2 – півсферичної; 3 – параболічної геометрії [5]

Найбільш використовувані на комерційному ринку світлодіоди з довжиною хвилі оптичного випромінювання 850 нм та 940 нм. Розглянемо ці світлодіоди на конкретних прикладах. Для огляду візьмемо світлодіоди від компаній Osram Opto Semiconductors (рис. 24).

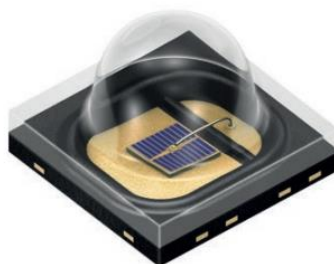


Рисунок 24 – Світлодіод від компанії Osram Opto Semiconductors [7]

Компанія пропонує широкий асортимент світлодіодних пристроїв з різними параметрами та характеристиками для різних застосувань. Для аналізу візьмемо ІЧ-світлодіоди SFH 4715S для довжини хвилі випромінювання 850 нм та SFH 4725S – для 940 нм.

SFH 4715S – відомий своєю високою потужністю та ефективністю. Світлодіод випромінює на довжині хвилі 850 нм (рис. 25), що робить його придатним для застосувань у ближньому ІЧ-діапазоні. Основні особливості цього світлодіода включають високоефективний подвійний емітер, низький тепловий опір та оптимізацію для роботи з високими імпульсними струмами. Корпус світлодіода виконаний з прозорого силікону. Він призначений для різноманітних застосувань, таких як системи контролю доступу, безпеки та медичного освітлення.

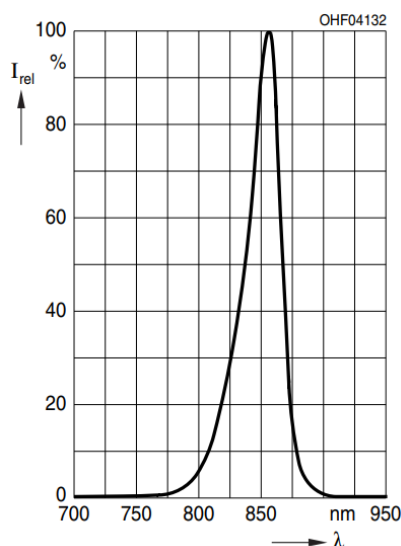


Рисунок 25 – Спектральна характеристика світлодіода Osram SFH 4715S [7]

Світлодіод демонструє надійну продуктивність з інтенсивністю випромінювання від 355 до 900 мВт/ср в залежності від моделі. Напруга прямого зміщення коливається від 2.95 В до 3.5 В при струмі 1 А. Конструкція світлодіода дозволяє ефективно працювати з тепловим опором від 6.0 до 9.0 К/Вт.

SFH 4725S – ефективний світлодіод для безпекових систем, у яких важливою вимогою є непомітне для людського ока світіння пристрою. Виготовлений із прозорого силікону, світлодіод оснащений подвійним емітером, оптимізованим для високоефективного ІЧ випромінювання. З довжиною хвилі 940 нм (рис. 26), він ідеально підходить для безпекових застосувань. Світлодіод володіє спектральною шириною на рівні 50% максимальної відносної інтенсивності 37 нм та працює в діапазоні прямої напруги від 2.65 В до 4.2 В.

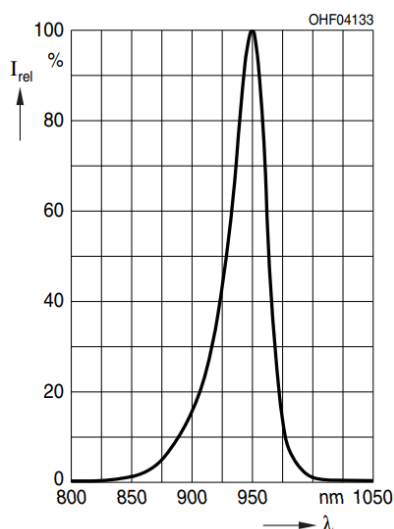


Рисунок 26 – Спектральна характеристика світлодіода SFH 4725S [8]

Симетрична випромінювальна характеристика (рис. 27) з кутом розсіювання 40° забезпечує ефективний розподіл світла.

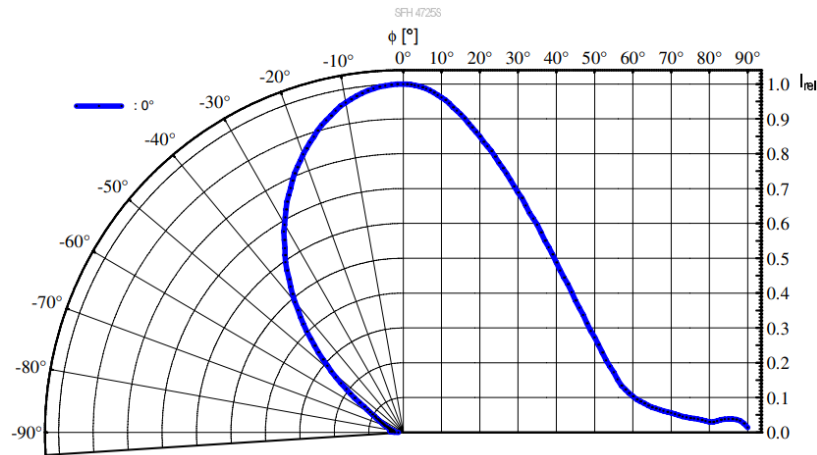


Рисунок 27 – Випромінювальна характеристика та діаграма направленості світлодіода SFH 4725S [8]

Крім того, низький тепловий опір до 9 K/Wt є важливим для підтримання продуктивності та довговічності. Цей світлодіод підходить для застосувань, що вимагають ближнього ІЧ-світла, завдяки оптимізованому випромінюванню та міцній конструкції.

Висновки до розділу: Було детально описано різні режими ІЧ-підсвічування, включаючи рухомий затвор та модуляцію ІЧ-світла, та їх застосування в нічних камерах фото- та відеоспостереження. Важливість цих технологій полягає у здатності покращувати якість зображення в умовах низького освітлення.

Розділ зосереджується на спектральних характеристиках кремнієвих фотоприймачів, ключових для ІЧ-відеоспостереження. Описується важливість квантової ефективності, спектральної чутливості, швидкості відгуку та інших параметрів, що визначають ефективність цих приймачів у різних умовах.

В розділі обговорюються спектральні характеристики різних типів світлодіодів, особливо у контексті випромінювання в ближньому ІЧ-діапазоні. Приклади комерційних світлодіодів демонструють значний прогрес у виробництві високоефективних ІЧ-світлодіодів для специфічних застосувань, наприклад, у системах безпеки.

2 МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір обладнання та програмного забезпечення

Далі буде розглянуто обладнання, яке використовувалося в роботі з метою проведення експериментальних досліджень в рамках практичної частини даної роботи.

2.1.1 Камера Reolink E1 Outdoor PoE

З метою проведення експериментальних досліджень в роботі обрано сучасну роботизовану (поворотну варіофокальну) камеру моделі Reolink E1 Outdoor PoE (рис. 28) (функції панорамування, нахилу та «зуму» - Pan, Tilt, Zoom, PZT), з можливістю альтернативного живлення або від джерела постійного струму 12 В, 1 А, або через мережевий кабель Ethernet в стандарті IEEE 802.3af, 48 V Active (Power on Ethernet, PoE).



Рисунок 28 – Камера Reolink E1 Outdoor PoE: 1 – сенсор освітлення; 2 – світлодіодні прожектора кольорового нічного бачення; 3 – варіофокальний об’єктив; 4 – світлодіоди прожектора інфрачервоного підсвічування; 5 – індикатор статусу камери [11]

Камера Reolink E1 Outdoor PoE розроблена для внутрішнього і зовнішнього використання, включає передові функції, що підходять для детального аналізу зображення у науковому контексті, забезпечує поле зору по горизонталі в межах 94°-50° і по вертикалі в межах 53°-30°. Вона оснащена якісним сенсором зображення - комплементарною Метал-Оксидною Напівпровідниковою (КМОН, CMOS) матрицею з роздільною здатністю 3840 x 2160 елементів зображення – пікселів (8МП) при частоті кадрів 25 кадрів за секунду та об'єктивом із 3-кратним оптичним масштабуванням («зумом»), що забезпечує можливість спостереження дрібних об'єктів та високоякісне зображення на значній відстані. Камера оснащена вбудованим прожектором нічного інфрачервоного підсвічування на відстань до 12 м (загалом 12 світлодіодів на довжині хвилі 850 нм загальною потужністю 2,7 Вт) та прожектором з кольоровою температурою 6500 К та яскравістю 180 Лм, що забезпечує режим кольорового нічного бачення (Spotlights 4 pcs/2.7W/6500K/180Lumens).

Програмне забезпечення від виробника забезпечує підтримку наступних протоколів і стандартів: HTTPS, SSL, TCP/IP, UDP, HTTP, IPv4, UPnP, RTSP, RTMP, ONVIF, SMTP, NTP, DHCP, DNS, DDNS, FTP, P2P та надає можливість автоматичного стеження за об'єктом, посилене функцією розумного виявлення людей чи транспортних засобів із зменшеною ймовірністю хибного спрацювання. Додатково камера також має двохсторонній аудіозв'язок та сирену. Для зберігання даних передбачено слот microSD ємністю до 256 ГБ.

Вона використовує PoE для спрощення установки та управління живленням, керується через додаток чи клієнт Reolink, сумісна з IoT-екосистемами та асистентами, такими як Google Assistant і Alexa, що підкреслює її адаптивність у системах розумного будинку. Камера Reolink E1 Outdoor PoE може використовуватися автономно в режимі «точка-точка» або в складі систем IP відеоспостереження, підключатися до мережевих (NVR) і гібридних (XVR) відеореєстраторів за допомогою локальної мережі. Камера забезпечує віддалений візуальний контроль, транслює відеопотік на смартфон користувача, а також зберігає записи в архів на SD-карту. Для управління камерою за допомогою

смартфона використовується застосунок ReolinkLife, доступний для безкоштовного скачування з Play Market і Apple Store. Для керування камерою з ПК використовується клієнт Reolink, що є у відкритому доступі на сайті виробника.

2.1.2 Мережевий пристрій Cudy AC1200 WR1200

З метою розширення можливостей мобільності обраної камери було обрано мережевий пристрій Cudy AC1200 WR1200 (рис. 29).



Рисунок 29 – Мережевий пристрій Cudy AC1200 WR1200 [12]

Wi-Fi-маршрутизатор Cudy AC1200 WR1200 — це передовий мережевий пристрій, розроблений для задоволення вимог високошвидкісного підключення до Інтернету в різних середовищах. Цей маршрутизатор підтримує стандарт Wi-Fi 802.11ac, що забезпечує більш високу швидкість мережі до 1,2 Гбіт/с, покращене покриття та стабільніше бездротове з'єднання. Він працює на двох діапазонах, пропонуючи частоти 2,4 ГГц з пропускнуою швидкістю 300 Мбіт/с і 5 ГГц з пропускнуою швидкістю 867 Мбіт/с для розміщення широкого спектру бездротових пристроїв, мінімізуючи перешкоди та максимізуючи пропускну здатність.

Модель WR1200 оснащена чотирма антенами з високим коефіцієнтом посилення 5 dBi, які підвищують потужність сигналу та розширюють бездротове

покриття для усунення мертвих зон у великих будинках або офісах. Потужність передачі становить <20 дБм (2,4 ГГц) і <23 дБм (5 ГГц). Живлення пристрою здійснюється за допомогою блоку живлення, розрахованого на 12 В/1 А.

Даний мережевий пристрій оснащений функціями 4в1 і, зокрема, включає в себе Wi-Fi роутер, Wi-Fi подовжувач, точка доступу та WISP роутер. В даній роботі мережевий пристрій використано у якості Wi-Fi подовжувача.

Однією з ключових особливостей Cudy WR1200 є 4 x 100/10 Мбіт/с LAN порти, які забезпечують високошвидкісне дротове з'єднання для різних мультимедійних пристроїв. Мережевий пристрій оснащений протоколом шифрування WPA/WPA2, для захисту мережі від несанкціонованого доступу. А також тут наявна технологія VPN з клієнтами PPTP, L2TP, OpenVPN та WireGuard.

Інтерфейс користувача маршрутизатора розроблений для простоти налаштування та керування. Він пропонує простий, але комплексний веб-інтерфейс для налаштування параметрів мережі, моніторингу стану мережі та застосування оновлень мікропрограми. WR1200 також підтримує розширені функції, такі як якість обслуговування (QoS), яка визначає пріоритет пропускну здатності для додатків, які вимагають безперебійного підключення.

2.1.3 Світлодіодний драйвер

Драйвери дозволяють жити потужні світлодіоди, оскільки вони виступають у ролі пристрою-перетворювача мережевої напруги у постійний струм. Драйвер є стабілізованим джерелом струму і, у порівнянні з блоками живлення, що забезпечують постійну вихідну напругу, здатні підтримувати постійним стабільний струм через навантаження у схемі. Яскравість світлодіода залежить від сили струму, що протікає через нього, а тому важливо будувати схему на базі стабілізованого джерела живлення для забезпечення однорідного світіння світлодіода.

Перевагами LED-драйвера перед блоками живлення можна вважати: стабільний струм для забезпечення сталого світлового потоку, подачу максимально

допустимої потужності на світловипромінювальний діод для досягнення високої світловіддачі, порівняно невисоке споживання електроенергії через некритичні вимоги до включення обмежувального резистора в схему.

У нашій роботі запропоновано схему драйвера світлодіодів на основі операційного підсилювача та транзистора (рис. 30).

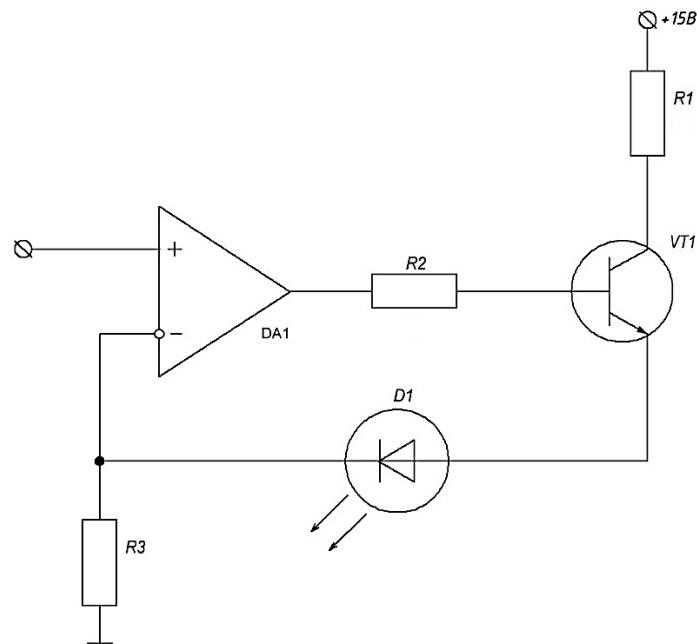


Рисунок 30 – LED-драйвер. Схема електрична принципова

Ця схема є перетворювачем напруги в струм, використовуваною як світлодіодний драйвер. Вона містить декілька ключових компонентів, які працюють разом для контролю струму через світлодіод.

Опишемо внесок кожного компонента схеми у загальну роботу схеми.

Операційний підсилювач DA1 – основний елемент схеми, що забезпечує регулювання струму. Операційний підсилювач налаштований в такий спосіб, що підтримує напругу на інвертуючому вході (-) рівною напрузі на неінвертуючому вході (+), тим самим регулюючи струм через світлодіод.

Вхідний сигнал, що подається на неінвертуючий вхід операційного підсилювача – це вхідна напруга, яку треба перетворити в струм для забезпечення роботи світлодіода. Коли напруга подається на неінвертуючий вхід, він забезпечує потрібний вихідний струм, щоб утримувати інвертуючий вхід на тому ж рівні

напруги. На цей вхід подається прямокутний сигнал із заданою амплітудою та скважністю.

Резистор R3 визначає струм через світлодіод. Струм, що протікає через резистор R3, визначається за допомогою закону Ома на основі напруги на операційному підсилювачі.

Транзистор VT1 використовується для керування струмом через світлодіод. Операційний підсилювач регулює базовий струм транзистора, що, в свою чергу, забезпечує потрібний струм через емітер до світлодіода.

Резистор R2 допомагає встановити правильну робочу точку для бази транзистора VT1, а *резистор R1* встановлює верхню межу струму, який може протікати через світлодіод, тим самим захищаючи його від перевантаження.

Світлодіод D1 використовується як індикатор або світловий елемент, і його яскравість регулюється струмом, який протікає через нього. Він є навантажувальним елементом у даній схемі.

Наведемо загальний розрахунок даної схеми. Спочатку нам необхідно розрахувати номінал резистора R3, який встановлює струм через світлодіод. Він буде визначатися за законом Ома:

$$R3 = \frac{U_{\text{вх.ОП}}}{I_{D1}} \quad (8)$$

де $U_{\text{вх.ОП}}$ – напруга, що подається на неінвертуючий вхід операційного підсилювача DA1, I_{D1} – струм, що протікає через світлодіод D1.

Розрахунок струму бази I_B транзистора можна розрахувати через струм емітера, що рівний струму через світлодіод:

$$I_B = \frac{I_{D1}}{h_{FE}} \quad (9)$$

де h_{FE} – коефіцієнт підсилення транзистора за струмом.

Далі нам необхідно визначити номінал резистора R2. Він потрібен для стабілізації робочої точки транзистора. Цей компонент визначає базовий струм транзистора, який потрібен для отримання бажаного струму через емітер. Якщо ми

припустимо, що напруга на базі транзистора U_B дорівнює $U_{\text{вх.ОП}}$, то $R2$ можна розрахувати так:

$$R2 = \frac{U_{\text{вх.ОП}} - U_{\text{БЕ}}}{I_B} \quad (10)$$

де $U_{\text{БЕ}}$ – напруга база-емітер.

Резистор $R1$ встановлює верхню межу для струму через світлодіод, захищаючи його від перевантаження. Якщо ми знаємо максимально допустимий струм для світлодіода і напругу живлення $U_{\text{ж}}$, то $R1$ можна розрахувати так:

$$R1 = \frac{U_{\text{ж}} - U_{\text{Д1}}}{I_{\text{Д1max}}} \quad (11)$$

де $U_{\text{Д1}}$ – напруга на світлодіоді при максимальному струмі, $I_{\text{Д1max}}$ – максимально допустимий струм через світлодіод.

2.1.4 Інфрачервоні світлодіоди

Для проведення дослідження було обрано дві моделі ІЧ-світлодіодів, а саме: 850 нм – SFH 4556 (Osram) та 940 нм – IR928-6C-F (Everlight).

SFH 4556 (рис. 31) – потужний інфрачервоний світлодіод з піковою довжиною хвилі 860 нм і центроїдною довжиною хвилі 850 нм (рис. 32).



Рисунок 31 – світлодіод SFH 4556 (Osram) з довжиною хвилі випромінювання 850 нм [15]

Основні характеристики включають короткий час перемикавання та високу інтенсивність випромінювання (145 мВт/сер при 100 мА, імпульс 20 мс). Він підходить для інфрачервоного підсвічування камер, сенсорної технології та передачі даних.

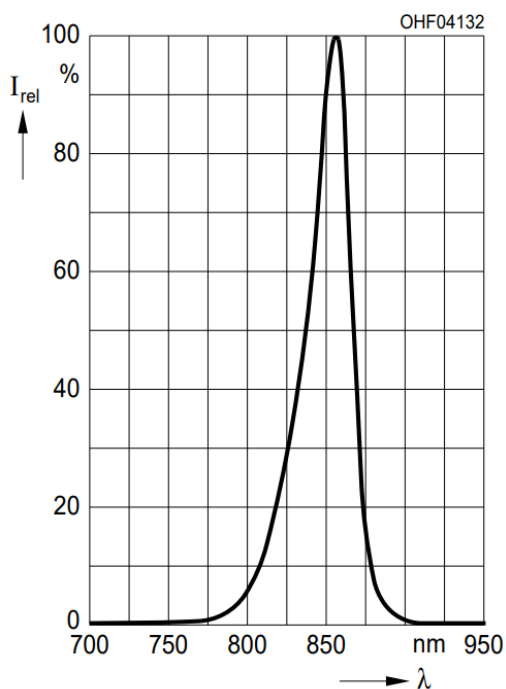


Рисунок 32 – Спектральна характеристика світлодіода SFH 4556 (Osram) [15]

Максимальні параметри включають прямий струм 100 мА та імпульсний струм 1 А. Світлодіод має тепловий опір 450 К/Вт і може працювати в діапазоні температур від -40 до +100 °С. Додатково, світлодіод SFH 4556 має прозорий корпус, який дозволяє максимально використовувати його інфрачервоне випромінювання (рис. 33).

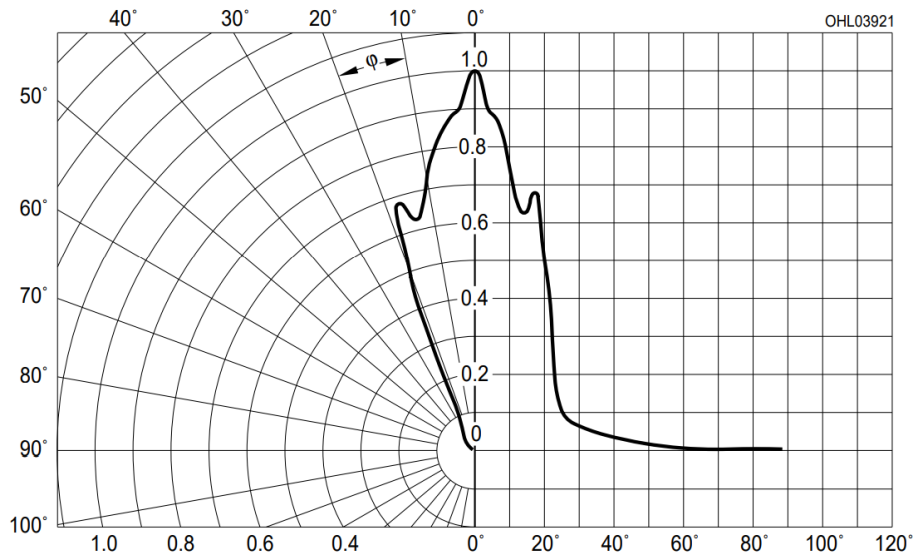


Рисунок 33 – Випромінювальна характеристика світлодіода SFH 4556 (Osram) [15]

Також, важливо зазначити, що хоча світлодіод випромінює невидиме людському оку світло, він може бути шкідливим для очей при прямому впливі. Це

вимагає обережності під час роботи з цим компонентом, особливо у випадку використання високих інтенсивностей.

IR928-6C-F (рис. 34) – потужний інфрачервоний світлодіод.



Рисунок 34 – світлодіод IR928-6C-F (Everlight) з довжиною хвилі випромінювання 940 нм [16]

Він вирізняється високою надійністю, високою інтенсивністю випромінювання та піковою довжиною хвилі 940 нм (рис. 35). Пристрій має прозорий пластиковий корпус, що дозволяє ефективно випромінювати інфрачервоне випромінювання.

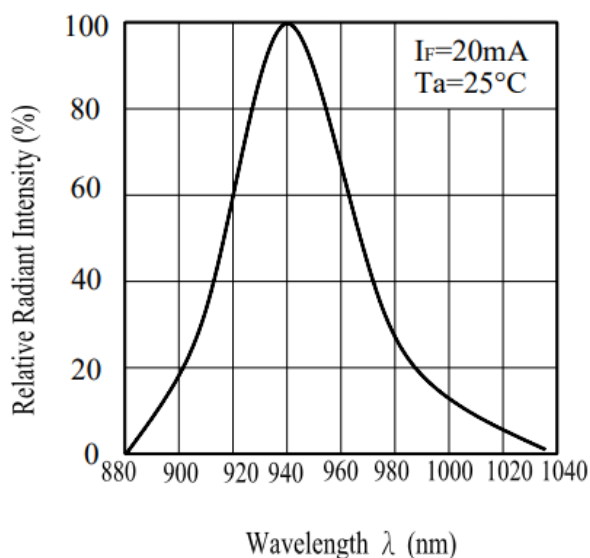


Рисунок 35 – Спектральна характеристика світлодіода IR928-6C-F (Everlight) [16]

Світлодіод виготовлено з матеріалу GaAlAs і має безперервний прямий струм 50 мА, піковий прямий струм 1,0 А та розсіювану потужність 75 мВт. Він працює в діапазоні температур від -25 до +85 °С. Крім того, світлодіод демонструє пряму напругу від 1,2 до 1,5 В при 20 мА та зворотну напругу 5 В. Його кут огляду становить 20 градусів (рис. 36), що забезпечує сфокусований промінь інфрачервоного світла.

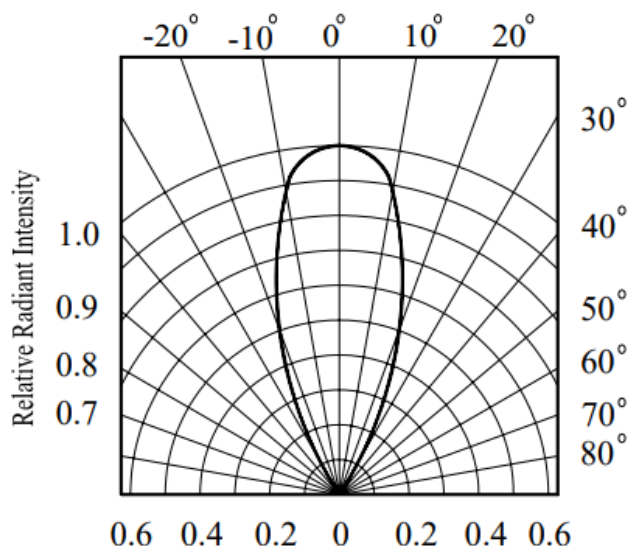


Рисунок 36 – Випромінювальна характеристика світлодіода IR928-6C-F (Everlight) [16]

Цей світлодіод розроблений для високої ефективності з довжиною хвилі випромінювання, близькою до пікової чутливості більшості ІЧ-приймачів. Він ідеально підходить для застосувань, які вимагають точного та потужного інфрачервоного освітлення, наприклад, пультів дистанційного керування, систем спостереження та обладнання нічного бачення. Поєднання високої інтенсивності випромінювання та вузького кута огляду робить його придатним для ІЧ-зв'язку та зондування на великій відстані.

2.1.5 NI Elvis II

Прототип LED-драйвера зі світлодіодом ІЧ-спектру випромінювання було побудовано на базі пристрою від National Instruments – NI ELVIS II (рис. 37).

NI ELVIS II – це модульний інженерний навчальний лабораторний пристрій, розроблений спеціально для академічних установ. Він має один компактний форм-фактор, інтегрований з 12 інструментами, які найчастіше використовуються в лабораторії, включаючи осцилограф, цифровий мультиметр, функціональний генератор, джерело змінного живлення, аналізатор Боде, тощо [13].

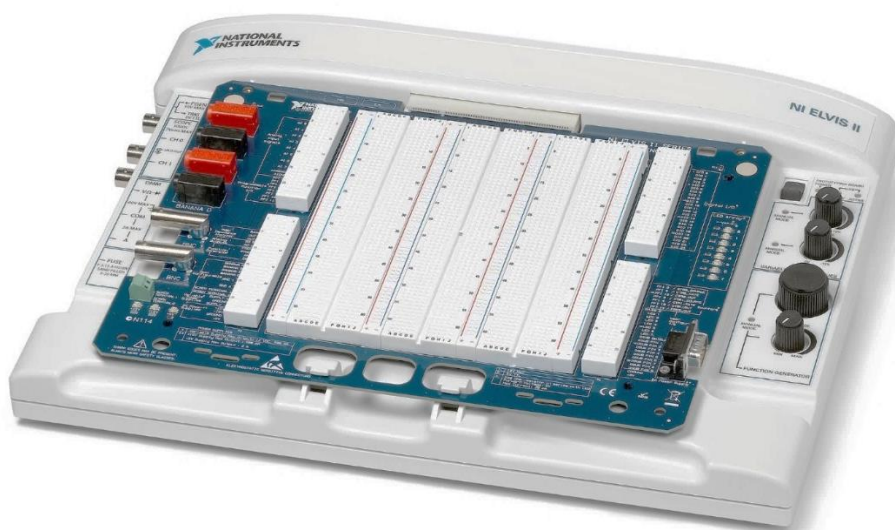


Рисунок 37 – Модульний інженерний навчальний лабораторний пристрій NI ELVIS II [13]

Серія NI ELVIS II поєднує апаратне та програмне забезпечення в один повний лабораторний пакет [14]. Робоча станція має легкі у керуванні регулятори для змінних джерел енергії та функціонального генератора. Вона також надає зручність підключення через роз'єми BNC та типу "банан" для функціонального генератора, осцилографа та інших приладів DMM (рис. 38).

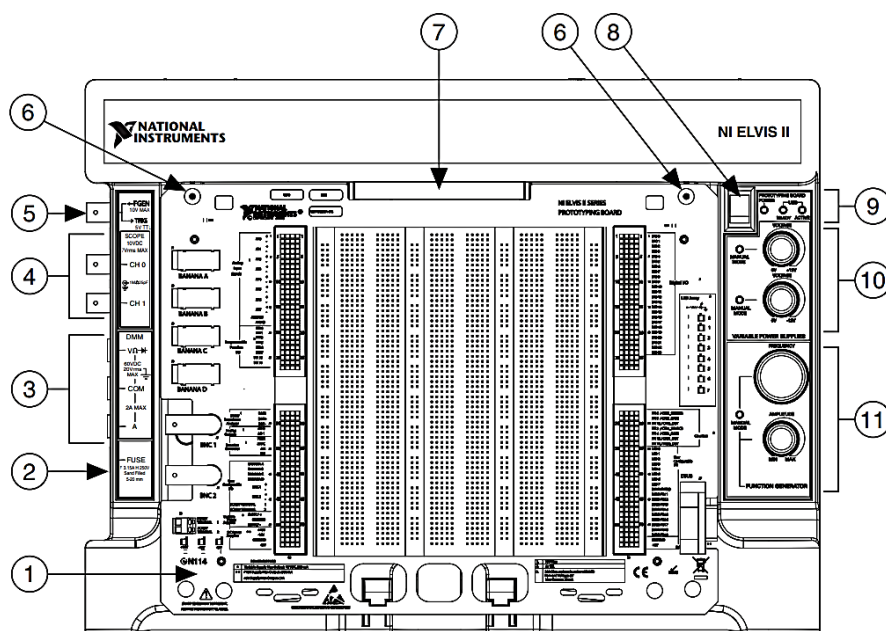


Рисунок 38 – Вид зверху на робочу станцію NI ELVIS II із прототипною платою: 1 – прототипна плата NI ELVIS II; 2 – запобіжник DMM; 3 – роз'єми DMM; 4 – роз'єми для осцилографа; 5 – вихід функціонального генератора/вхідний роз'єм цифрового тригера; 6 – отвори під гвинти для кріплення прототипної плати; 7 – роз'єм плати для прототипування; 8 – перемикач живлення прототипної плати; 9 – світлодіоди стану; 10 – змінні блоки живлення ручного керування; 11 – Ручні елементи керування функціонального генератора [14]

Плата для створення прототипів дає можливість для підключення схем до джерел живлення ± 15 В та +5В. У своєму дослідженні ми використовуємо джерело енергії ± 15 В. Змінні джерела живлення дозволяють регулювати вихідні напруги в діапазоні від 0 до +12 В на терміналі SUPPLY+ і від 0 до -12 В на терміналі SUPPLY-. Всі джерела живлення NI ELVIS II підключені до терміналу GND.

Осцилограф NI ELVIS II використовує аналогове введення для досягнення швидкості збору даних до 1,25 Мс/с для одного каналу або 500 кс/с для двох каналів при 16-бітній роздільній здатності. У той час як осцилограф NI ELVIS II+ використовує високоспеціалізовані аналого-цифрові перетворювачі для збору даних зі швидкістю 100 Мс/с і роздільною здатністю 8 біт на одному або обох каналах.

Вихід функціонального генератора може бути спрямований як до BNC роз'єму FGEN/TRIG, так і до роз'єму FGEN на макетній платі. Цифровий сигнал +5 В доступний через роз'єм SYNC. Для модуляції амплітуди та частоти вихідного сигналу функціонального генератора передбачені аналогові входи АМ і FM.

Для конфігурації пристрою з комп'ютером використовувалася наступна схема підключення (рис. 39):

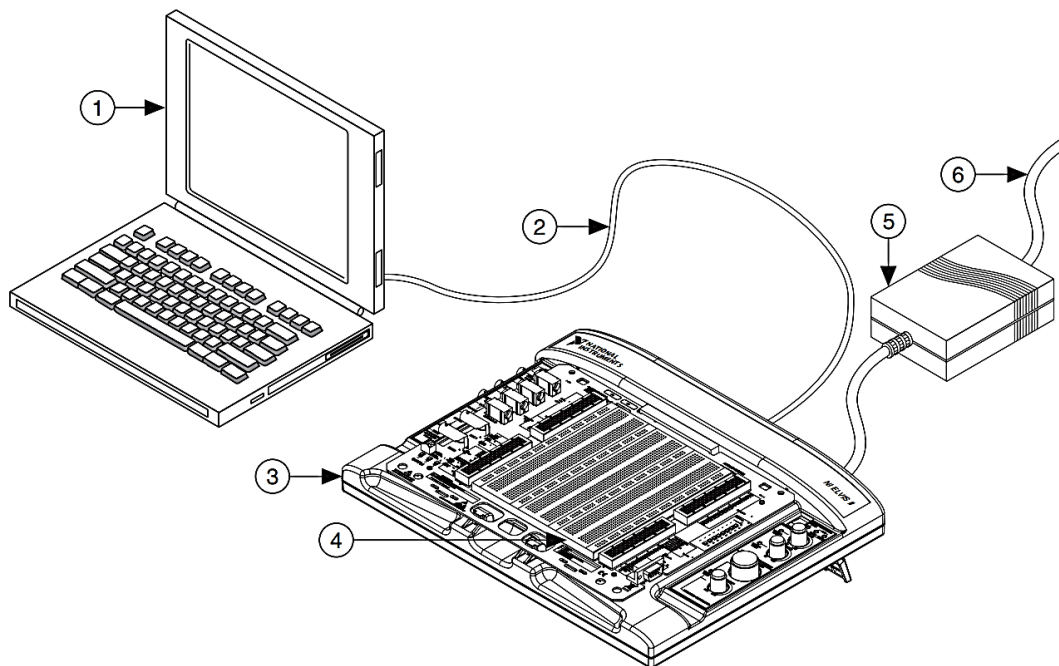


Рисунок 38 – Схема підключення NI ELVIS II до комп'ютера: 1 – комп'ютер; 2 – кабель USB; 3 – робоча станція NI ELVIS II; 4 – прототипна плата NI ELVIS II; 5 – джерело живлення змінного/постійного струму; 6 – розетки [14]

2.1.6 Програмне забезпечення NI Elvismx (LabView)

Згаданий вище багатофункціональний лабораторний пристрій NI ELVIS II може управлятися з персонального комп'ютера за допомогою фірмового програмного забезпечення від National Instruments – NI Elvismx (рис. 39).

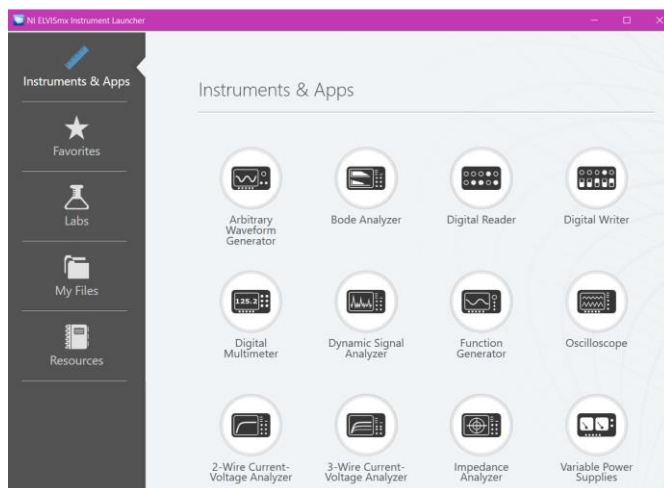


Рисунок 39 – Вікно програмного комплексу NI Elvismx

Даний програмний комплекс створено у середовищі LabView і надає можливості роботи з віртуальними приладами, які мають свої переваги. У даній роботі було використано функціональний генератор та осцилограф, тому варто приділити увагу детальному огляду цих функцій.

Функціональний генератор (рис. 40) здатний генерувати різні типи сигналів, такі як синусоїда, квадрат та трикутник. Він також дозволяє налаштувати амплітуду та частоту сигналу. Крім того, пристрій має функції зсуву постійного струму, розгортки частоти, амплітудної та частотної модуляції.

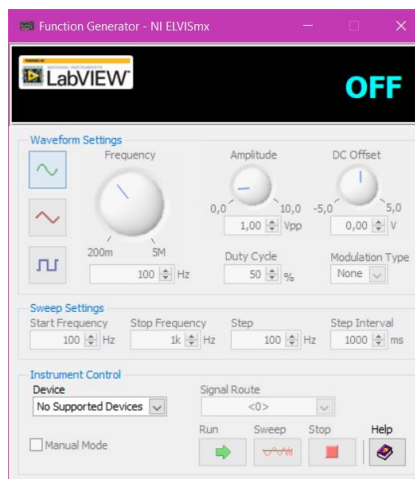


Рисунок 40 – Вікно функціонального генератора NI Elvismx

Осцилограф (рис. 41) надає функції традиційного осцилографа, типового для студентських лабораторій. Осцилограф NI ELVISmx SFP, оснащений двома каналами, включає ручки для масштабування, регулювання положення та змінної часової розгортки. Користувачі можуть налаштовувати параметри джерела та режиму тригера. Автоматичне масштабування дозволяє оптимально відобразити сигнал. Інструмент пропонує цифрові та аналогові тригери, а підключення до осцилографа відбувається через BNC-роз'єми. Комп'ютерний дисплей надає можливість точних вимірювань за допомогою курсорів.

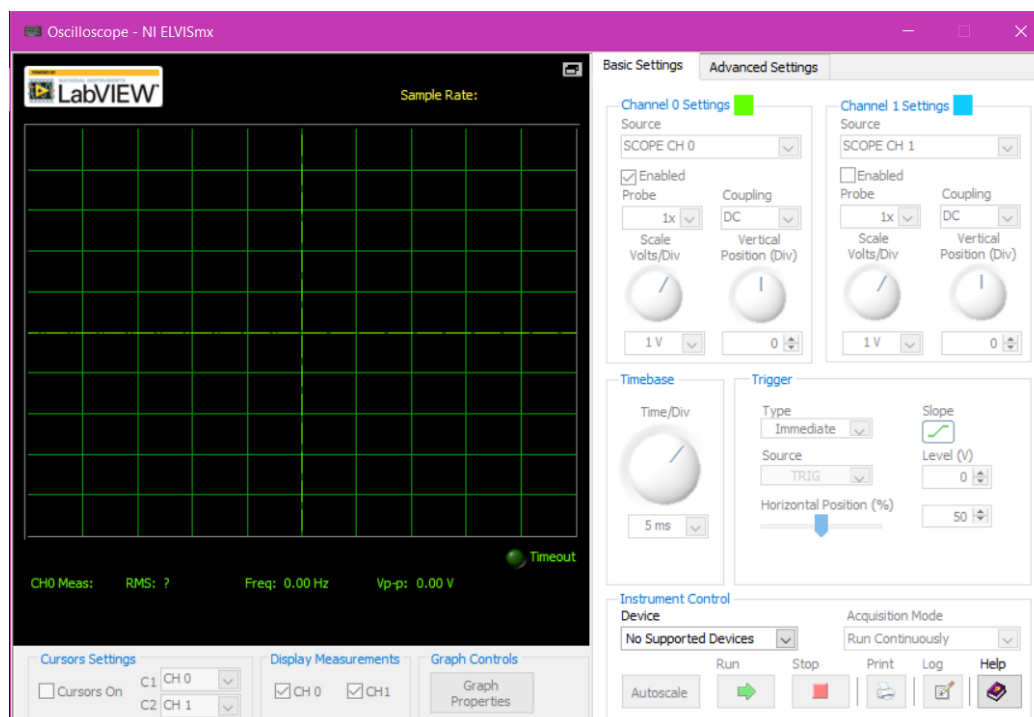


Рисунок 41 – Вікно осцилографа NI Elvismx

2.1.7 Тест роздільної здатності USAF 1951

У своєму дослідженні для візуалізації та оцінки результатів ми застосовуємо тестові мішені. Вони використовуються для оцінки ефективності систем візуалізації, включаючи діагностику проблем у системі, оцінку параметрів системи, сертифікацію або аналіз вимірювань. Якість зображення оцінюється за допомогою різних параметрів, таких як роздільна здатність, контрастність, функція передачі модуляції (MTF), глибина різкості (DOF), спотворення, тощо. Різні системи можуть вимагати різних мішеней для оцінки. Важливо використовувати програмне

забезпечення для об'єктивної перевірки, оскільки візуальні спостереження можуть бути суб'єктивними і залежати від індивідуального досвіду.

У роботі використовується тестова мішень ВПС США – USAF 1951 (рис. 42). Вона відома своїм використанням у різних тестах та випробуваннях.

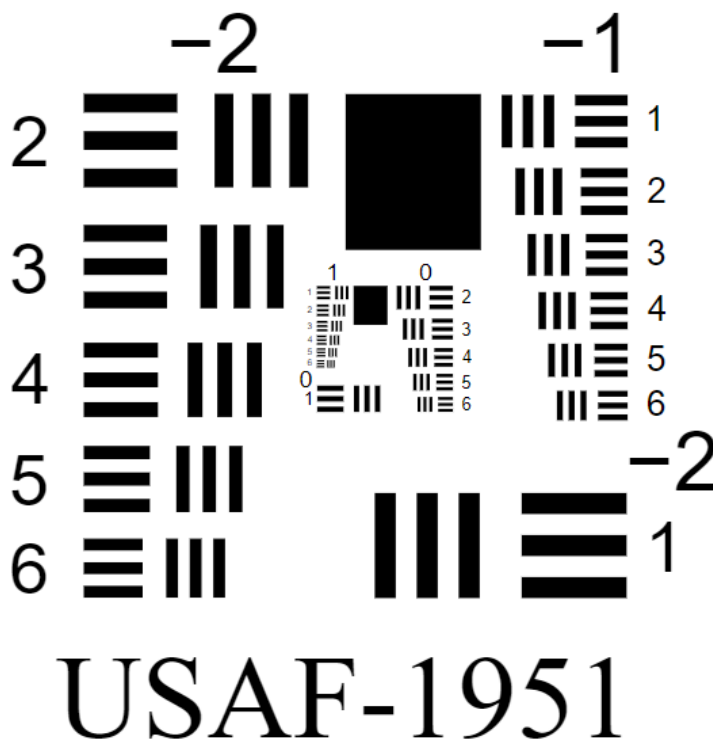


Рисунок 42 – Тестова мішень ВПС США 1951 року

Ця мішень містить ряди горизонтальних та вертикальних ліній, які мають різні розміри і називаються елементами, що дозволяє ефективно оцінювати роздільну здатність оптичних систем.

Горизонтальні та вертикальні елементи тестової мішені використовуються для одночасної оцінки горизонтальної та вертикальної роздільної здатності на скінченних просторових частотах. Кожен елемент мішені має унікальну ширину та інтервали і позначений числом від 1 до 6. Ці елементи організовані у групи з власними ідентифікаційними номерами. Ці номери варіюються від -2 до 7 і використовуються для визначення просторової частоти. Роздільна здатність визначається за допомогою пар ліній (l_p), що включають одну чорну лінію і один проміжок.

Якісно, роздільна здатність системи візуалізації визначається як комбінація групи та елементів, яка розташована безпосередньо перед тим, як чорні та білі

смуги починають розмиватися [1]. Кількісно роздільна здатність (lp/mm) визначається рівнянням:

$$\xi = 2^{G + \left(\frac{E-1}{6}\right)} \quad (12)$$

де ξ – роздільна здатність у lp/mm, G – номер групи, E – номер елемента.

Мішені, котрі ми розглядаємо, розроблені так, що пари ліній з вищою роздільною здатністю зосереджені в центрі, а з нижчою – ближче до периферії. Це компонування ефективно при тестуванні варіофокальних лінз, адже вона дозволяє зберігати в полі зору елементи з вищою роздільною здатністю не переміщуючи тестові мішені під час збільшення, яке зменшує поле зору лінзи.

Існують певні обмеження на використання таких тестових зображень. Причиною є концентрація елементів з вищою роздільною здатністю у центрі мішені. Це створює виклики при оцінці об'єктів, оскільки роздільна здатність змінюється по полю зору. Для адекватної оцінки системи необхідно перевіряти як центр, так і краї поля зору, що вимагає додаткового часу для тестування. Часто потрібно регулювати фокус об'єктива для досягнення оптимальної роздільної здатності по всьому полю, що може впливати на центральну чіткість. Зниження центральної роздільної здатності не завжди є недоліком, адже об'єктив може залишатися відповідним для вимог конкретних цілей, забезпечуючи при цьому рівномірний фокус на всьому полі зору.

Змінність роздільної здатності в полі зору (FOV) вимагає аналізу різних точок поля перед визначенням продуктивності системи. Оптимальна робота об'єктива в центрі не гарантує його ефективності в інших зонах. Важливо проводити аналіз за фіксованого фокусу. Розфокусування для оцінки різних частин поля може викривити результати. Існують модифікації цієї мішені, які дозволяють аналізувати весь FOV, розподіляючи шаблони по різних ділянках.

2.2 Методи обробки та аналізу отриманих даних

Обробка та аналіз отриманих отриманих в ході дослідження зображень буде проводитися за допомогою оригінального програмного забезпечення.

Обробка результатів буде проведена за допомогою кількох методів. Зокрема, ми порівняємо отримані зображення за різними параметрами в залежності від частоти та скважності імпульсу, що надходив на ПЧ-світлодіод. Також застосуємо статистичний аналіз зображення і дослідження інтенсивності пікселів. Таким чином, ми зможемо оцінити деякі кількісні показники ефективності активного ПЧ-підсвічування. Один із методів оцінки зображень є візуальний аналіз, його варто також врахувати при підведенні підсумків проведеного експерименту.

2.2.1 Аналіз за яскравістю, різкістю, контрастом та шумами

Мета такого аналізу полягає в об'єктивному оцінюванні та порівнянні зображень. Цей метод має велике значення у різних областях, включаючи медичну візуалізацію, безпеку, наукові дослідження, а також у виробництві та контролі якості.

Основними завданнями аналізу є оцінка яскравості, яка включає визначення середньої інтенсивності зображення для виявлення його загальної освітленості; оцінка контрасту, що полягає у визначенні діапазону інтенсивностей від найтемніших до найсвітліших областей; оцінка різкості, яка передбачає аналіз чіткості зображення, особливо на краях об'єктів; та оцінка шумів, яка включає виявлення та оцінку рівня шуму.

Процес аналізу складається з кількох етапів: підготовка зображень (перетворення зображень у відтінки сірого, тощо); аналіз, де здійснюється оцінка яскравості за допомогою статистичних методів, оцінка контрасту через вимірювання максимальної та мінімальної інтенсивності, оцінка різкості за допомогою фільтрів, наприклад, Лапласіан, та оцінка шумів через визначення стандартного відхилення; візуалізація, в рамках якої створюються графіки або

діаграми для кожного параметра, а також проводиться порівняльний аналіз відмінностей та особливостей між зображеннями; інтерпретація результатів.

2.2.2 Аналіз за інтенсивністю пікселів

Даний метод має за мету виявлення впливу змінних параметрів, зокрема, частоти та скважності імпульсу ІЧ-підсвічування на якість зображення. Такий аналіз є ключовим для оптимізації налаштувань обладнання з метою досягнення найкращої можливої якості зображень, що має велике значення в таких сферах, як нічне відеоспостереження, астрономічне спостереження та медична візуалізація.

Метод передбачає попередню обробку зображення, аналіз розподілу інтенсивності пікселів, візуалізація результатів аналізу у вигляді гістограм. Гістограма – це графічне представлення розподілу інтенсивностей пікселів у зображенні. Вона показує, скільки пікселів мають певну інтенсивність від найнижчої до найвищої (у нашому випадку, від 0 до 255).

2.2.3 Статистичний аналіз

Статистичний аналіз зображень проводиться для кількісної оцінки різних характеристик зображень, які можуть включати контраст, яскравість, шум, текстуру, та інші важливі атрибути. Такий аналіз важливий у багатьох областях, включаючи медичну візуалізацію, дистанційне зондування, безпеку, та в області обробки зображень в цілому.

У даній роботі було проаналізовано такі параметри:

– стандартне відхилення: цей параметр визначає ступінь варіативності або розсіювання інтенсивностей пікселів від їх середнього значення. Високе стандартне відхилення вказує на більшу контрастність та різноманітність інтенсивностей пікселів у зображенні;

- ентропія: вона вимірює ступінь випадковості або невизначеності інтенсивностей пікселів. Вища ентропія часто означає, що зображення містить більше інформації;
- співвідношення сигнал/шум (SNR): цей параметр використовується для оцінки рівня корисного сигналу порівняно з рівнем фонового шуму. Високий SNR зазвичай вказує на кращу якість зображення з меншим впливом шуму;
- динамічний діапазон: це різниця між найтемнішими та найяскравішими елементами зображення. Великий динамічний діапазон зазвичай означає, що зображення може ефективно відображати як дуже світлі, так і дуже темні деталі.

2.2.4 Аналіз за кореляційною функцією

Кореляційна функція для зображень використовується для визначення ступеня подібності або залежності між двома зображеннями або між різними областями одного зображення. Найчастіше вона використовується для аналізу текстур, виявлення особливостей та при співставленні зображень.

Одним із способів реалізації кореляційної функції є використання крос-кореляції, яка вимірює подібність між двома зображеннями як функцію від зсуву одного зображення відносно іншого. У більш простому випадку, для аналізу залежності між інтенсивностями пікселів двох зображень, можна використати коефіцієнт кореляції Пірсона.

Кореляційна функція у контексті аналізу двох зображень з різною довжиною хвилі підсвічування може показати ступінь схожості або подібності між цими зображеннями. Вона вимірює, наскільки зміна інтенсивності пікселів на одному зображенні співпадає або корелює зі зміною інтенсивності пікселів на іншому зображенні при різних довжинах хвилі підсвічування.

Якщо кореляційна функція повертає велике значення (близьке до 1), це може свідчити про те, що зображення схожі або мають багато спільних особливостей. З іншого боку, якщо кореляційна функція повертає низьке значення (близьке до 0), це може вказувати на відсутність кореляції між зображеннями. Це означає, що

зміна інтенсивності пікселів на одному зображенні не корелює зі зміною інтенсивності пікселів на іншому зображенні, і вони можуть бути дуже відмінними за своєю структурою або властивостями.

2.2.5 Програмне забезпечення для аналізу

Аналіз яскравості, різкості, контрасту та шумів реалізується за допомогою алгоритму (додаток А.1-А.2), що передбачає обчислення різних параметрів зображення та візуалізацію результатів. Алгоритм реалізований за допомогою мови програмування Python у програмному середовищі Spyder (anaconda3) наступним чином: імпорт бібліотек `matplotlib`, `numpy` і `skimage` для обробки зображень і візуалізації результатів; визначення функцій для аналізу зображень («*calculate_brightness*» – обчислює середнє значення яскравості зображення, «*calculate_contrast*» – обчислює контраст зображення як різницю між максимальним і мінімальним значеннями інтенсивності пікселів; «*calculate_sharpness*» – використовує оператор Лапласа для обчислення різкості зображення; «*calculate_noise*» – обчислює стандартне відхилення значень пікселів зображення як міру шуму); задання шляхів до файлів зображень; аналіз зображень (завантаження кожного зображення за його шляхом; перетворення зображення в градацію сірого для обробки RGB-форматних файлів; обчислення параметрів; збереження результатів у список); візуалізація результатів (для кожного з чотирьох параметрів створюється гістограма, що показує значення цих параметрів для кожного зображення в залежності від змінного параметра; гістограми візуалізуються з відповідними мітками та кольорами).

Аналіз розподілу інтенсивності в залежності від змінних параметрів реалізовано у вигляді наступного алгоритму (додаток А.3-А.4): імпорт бібліотек; визначення шляхів до зображення і відповідних їм параметрів (також визначено кольори візуалізації кожного значення змінного параметра); завантаження зображення за вказаним шляхом; якщо зображення кольорове, обирається один канал, щоб отримати одновимірний масив; створення гістограми для плоского

масиву інтенсивностей пікселів (використовується 256 комірок, що відповідають можливим значенням від 0 до 256); візуалізація гістограм обраним кольором.

Алгоритм аналізу зображень за статистичними параметрами (додаток А.5-А6) реалізовано наступним чином: імпорт бібліотеки; конвертація зображення у сірі тони (якщо воно кольорове); визначення функцій («*calculate_snr*» – для обчислення співвідношення сигнал/шум (SNR); «*analyze_image*» – для обчислення параметрів стандартного відхилення, ентропії, SNR, динамічного діапазону, середнього значення); визначення шляхів до зображень і відповідних їм змінних параметрів, зокрема, частота та скважність; аналіз зображень за допомогою визначених функцій, результати зберігаються у списку «*results*»; візуалізація результатів (результати транспонуються, щоб відповідні їм параметри були згруповані; для кожного параметра створюється гістограма, яка показує його значення для кожного зображення).

Аналіз за кореляційною функцією реалізований за таким алгоритмом: імпорт бібліотек; визначення функції для обчислення («*calculate_correlation*» – функція приймає шляхи до зображень, перетворює їх у градації сірого (одноканальні), перевіряє, чи вони мають однаковий розмір, обчислює коефіцієнт кореляції Пірсона між плоскими масивами пікселів обох зображень); задаються шляхи до зображень; обчислюється коефіцієнт кореляції та виводиться його значення; будується графік кореляційної функції (використовується функція «*np.correlate*»); результати візуалізуються (по осі X графіка відображається зсув, по осі Y – значення кореляції); на графіку створюється легенда, необхідні підписи, заголовок та сітка для зручності сприйняття.

Висновки до розділу: Розділ підкреслює ефективність інфрачервоних світлодіодів у випромінюванні на певних довжинах хвиль, що є критичним для застосувань у нічному баченні та сенсорних технологіях. ІЧ-світлодіоди з різними піковими довжинами хвиль забезпечують гнучкість у виборі для специфічних застосувань, таких як пульт дистанційного керування, системи відеоспостереження та обладнання для нічного бачення.

Розробка ефективних LED-драйверів виявилася ключовою для забезпечення стабільності та оптимального керування ІЧ-світлодіодами. Аналіз показує, що правильне налаштування драйвера забезпечує кращу ефективність світлодіодів, знижуючи енергоспоживання та підвищуючи якість освітлення.

Використання прототипів LED-драйверів і ІЧ-світлодіодів на платформі NI ELVIS II демонструє практичну цінність теоретичних розробок. Оптимізація налаштувань LED-драйвера може значно підвищити ефективність ІЧ-підсвічування, що важливо для спеціалізованих застосувань.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Опис експерименту з активним інфрачервоним підсвічуванням

У даній роботі експериментальна частина полягає у отриманні зображень з обраної камери в умовах низького освітлення з підсвічуванням ІЧ-світлодіодами.

Схема установки для проведення досліджень включає: камеру Reolink E1 Outdoor PoE, ІЧ-світлодіоди на довжині хвилі 850 нм та 940 нм, лабораторний модуль NI ELVIS II з драйвером світлодіодів на його основі, мережевий пристрій Cudy AC1200 WR1200, штатив для камери, тестові мішені USAF 1951. Освітленість приміщення, при якому проводилось дослідження – 2 лк, тобто за мінімально можливою у конкретних умовах освітленості.

Дослідження проводилось в декілька етапів. Спочатку було отримано калібрувальні зображення з денним освітленням за освітленості: 1 м від мішені – 112 лк, та 2 м – 53 лк, а також за освітленості 2 лк з власним ІЧ-підсвічуванням заданої камери.

Розташовуємо ІЧ-світлодіод у полі зору камери. Подаємо на нього модульований імпульс. Його амплітуда протягом усього вимірювання залишалася постійною – на рівні 20 мА. Далі, регулюючи частоту модуляції імпульсу, який подається на вхід операційного підсилювача (рис. 30), отримуємо зображення для двох моделей світлодіодів. Робимо зображення з різною фокусною відстанню, регулюючи її за допомогою клієнта від виробника камери. Наступним кроком є отримання зображень за різної скважності імпульсу. За допомогою програмного забезпечення Elvismx у вікні функціонального генератора змінюємо скважність імпульсу та робимо фотознімки з різною фокусною відстанню.

Отримавши експериментальні зображення переходимо до їх підготовки перед аналізом. Для цього нам необхідно всі зображення привести до одного розміру, обрізавши частини зображень, які не несуть інформаційної цінності. Вихідний розмір усіх зображень 500x700 пікселів.

Далі обробляємо отримані результати за допомогою оригінального програмного забезпечення, лістинг якого наведений у Додатку А. Аналіз проводився за вже згаданими вище методами. Результатом аналізу є візуальний огляд зображень та оцінка їх якості, а також візуалізація аналізованих кількісних параметрів у вигляді графіків залежності від змінних у нашому дослідженні параметрів, зокрема, частоти та скважності імпульсу.

3.2 Аналіз отриманих результатів

В даному розділі ми проводитимемо аналіз отриманих зображень за вищезгаданими методиками. Отже, розпочнемо з аналізу зображень за яскравістю, контрастом, різкістю та шумами в залежності від змінних параметрів – частоти та скважності модулюючого імпульсу, що надходить до світлодіода.

На рис. 43-55 представлено результати аналізу.

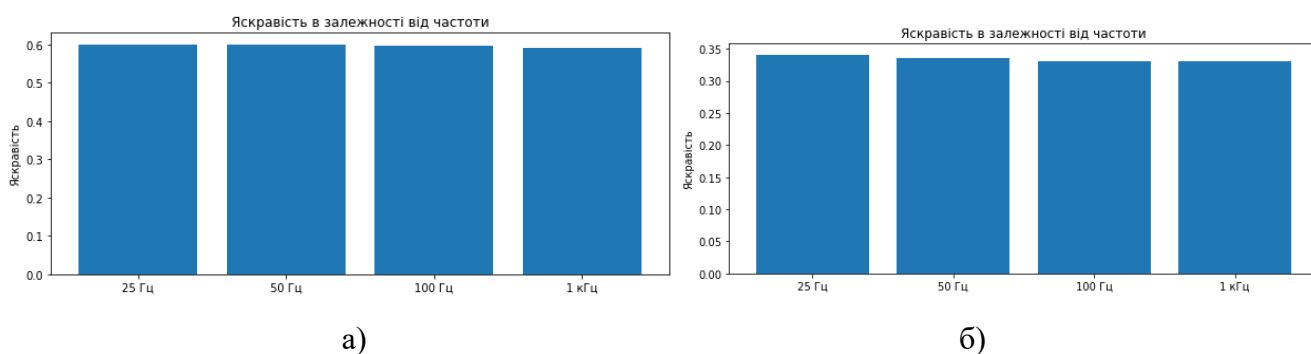


Рисунок 43 – Залежність яскравості від частоти модуляції при скважності $Q = 2$ на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм

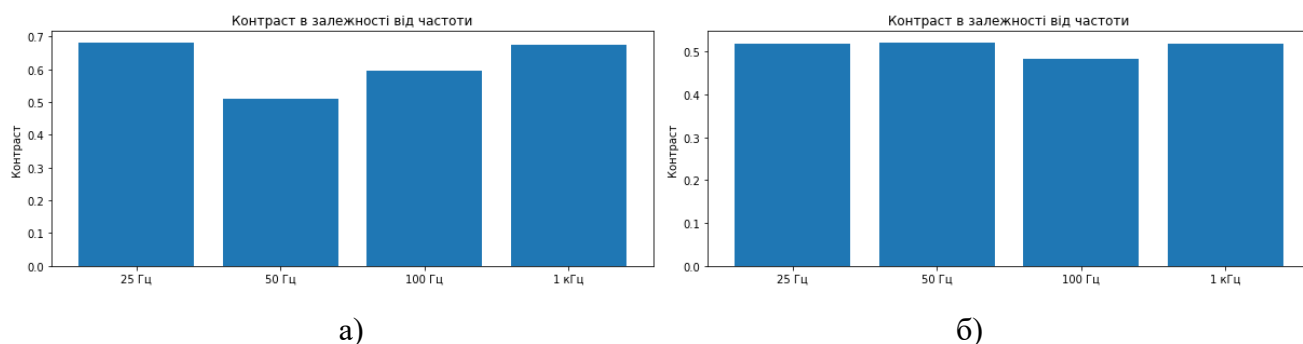


Рисунок 44 – Залежність контрасту від частоти модуляції при скважності $Q = 2$ на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм

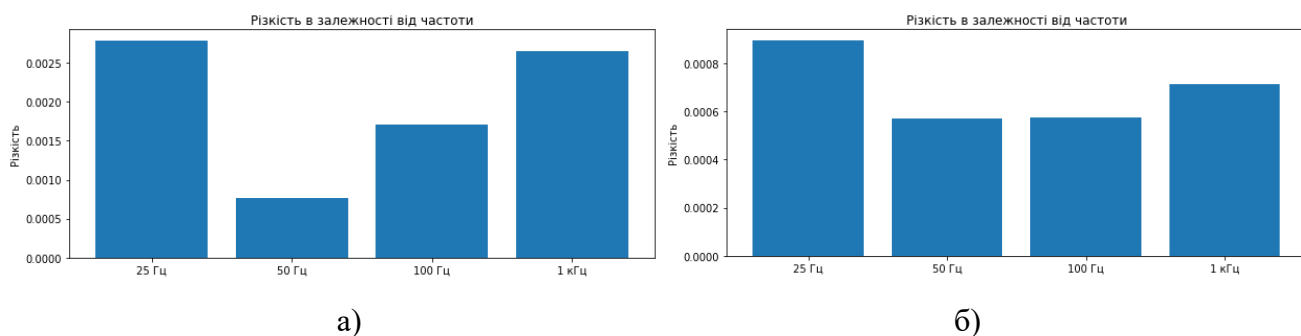


Рисунок 45 – Залежність різкості від частоти модуляції при скважності $Q = 2$ на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм

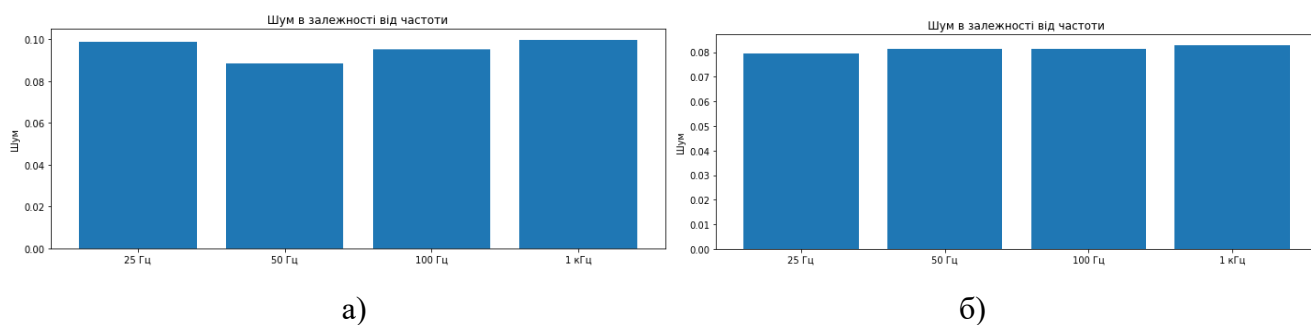


Рисунок 46 – Залежність шумів від частоти модуляції при скважності $Q = 2$ на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм

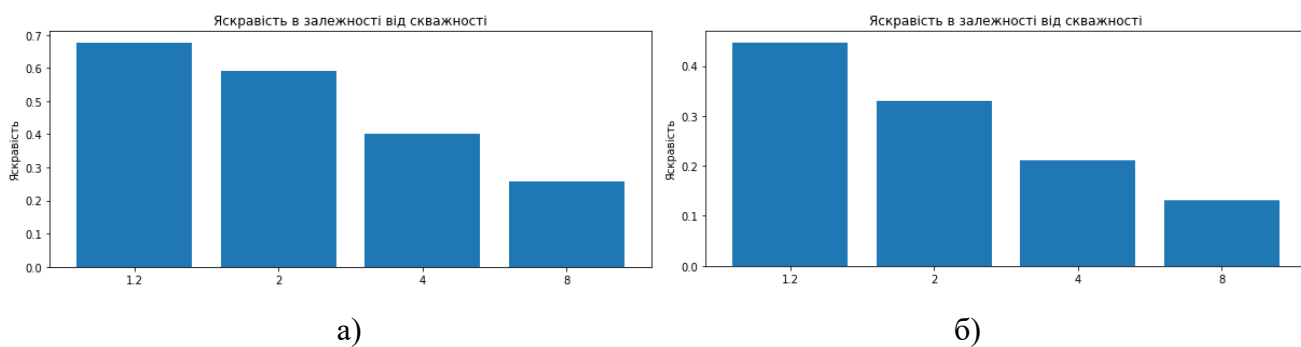


Рисунок 47 – Залежність яскравості від скважності при частоті модуляції $f = 1$ кГц на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм

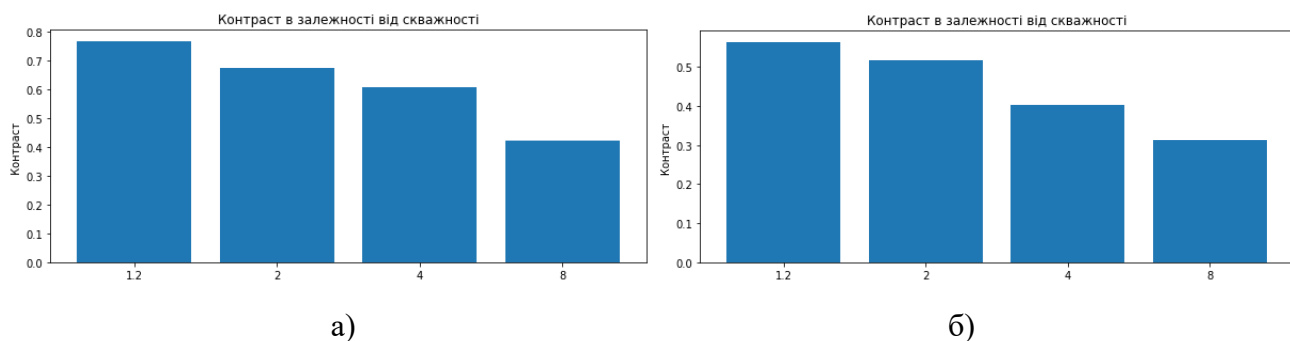


Рисунок 48 – Залежність контрасту від скважності при частоті модуляції $f = 1$ кГц на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм

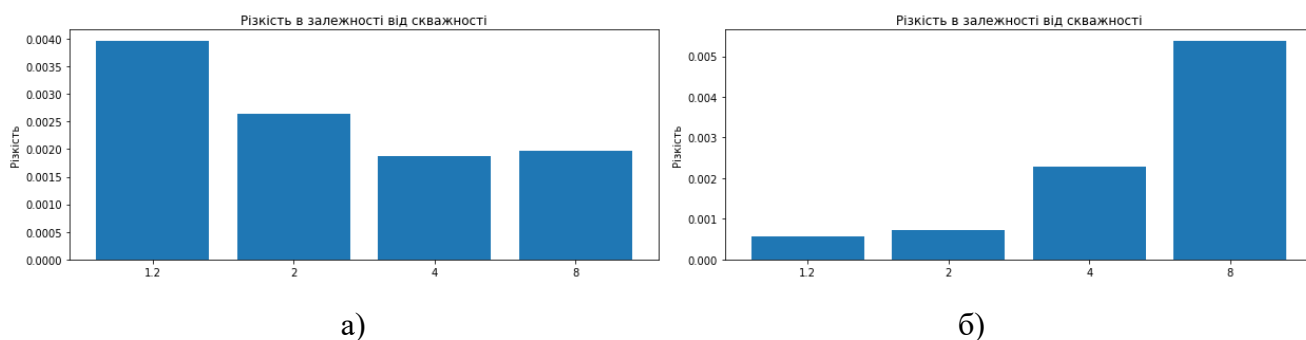


Рисунок 49 – Залежність різкості від скважності при частоті модуляції $f = 1$ кГц на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм

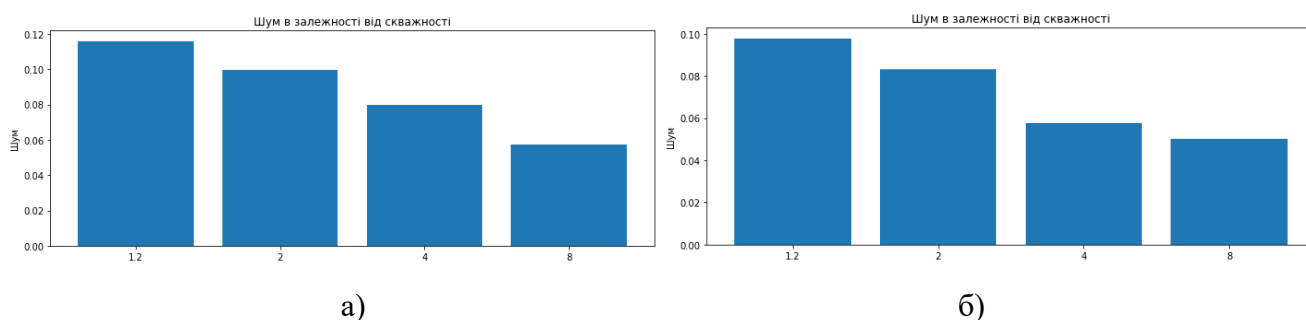


Рисунок 50 – Залежність шумів від скважності при частоті модуляції $f = 1$ кГц на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм

Аналізуючи рисунки зі змінним параметром частоти модуляції імпульсу, ми можемо однозначно вважати, що цей параметр не становить значного впливу на загальну яскравість. На довжині хвилі 850 нм контраст зображення збільшується зі збільшенням частоти, однак відбувається просідання по контрасту при 50 Гц. Точка спадання контрасту не досліджувалася. На довжині хвилі 940 нм особливостей не відмічалось. З різкістю та шумами спостерігається аналогічна до контрасту залежність. Однак, як бачимо з рис. 45, наявний спад різкості після відмітки 25 Гц.

Аналізуючи рисунки зі змінним параметром скважності імпульсу бачимо майже лінійну залежність яскравості від цього параметра на обох довжинах хвилі. Схожі залежності виявляються з параметрами контрасту та шумів. На рис. 49 бачимо відмінності між довжинами хвиль 850 нм та 940 нм. На довжині 850 нм залежність схильна до спадання різкості зі зміною скважності імпульсу, з довжиною хвилі 940 нм ситуація діаметрально протилежна – ми спостерігаємо збільшення різкості. Загальна тенденція до більших показників в залежності від частоти та скважності спостерігається на довжині хвилі 850 нм.

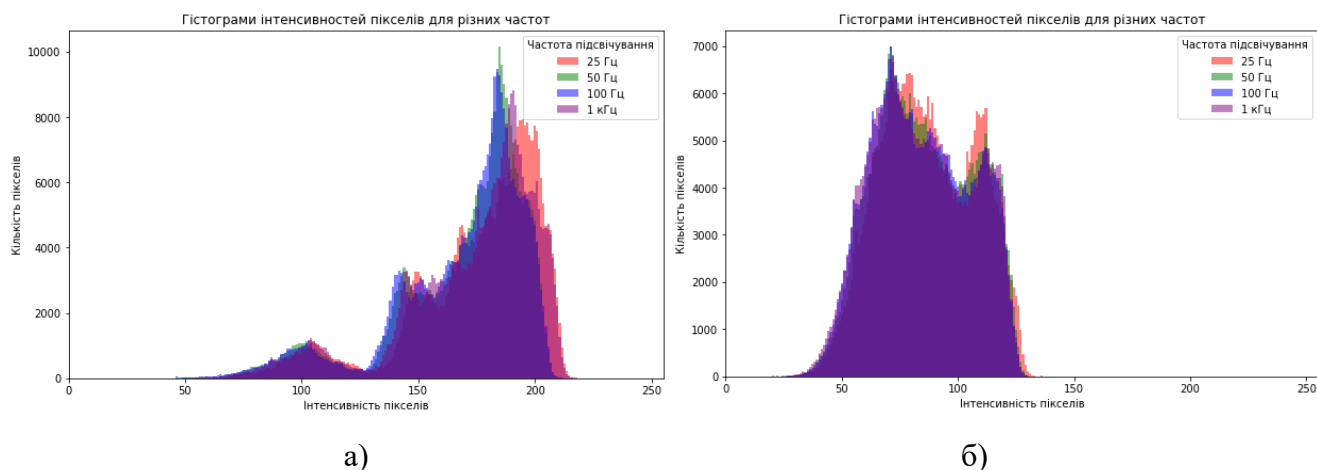


Рисунок 51 – Залежність розподілу інтенсивності пікселів від частоти модуляції при скважності $Q = 2$ на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм

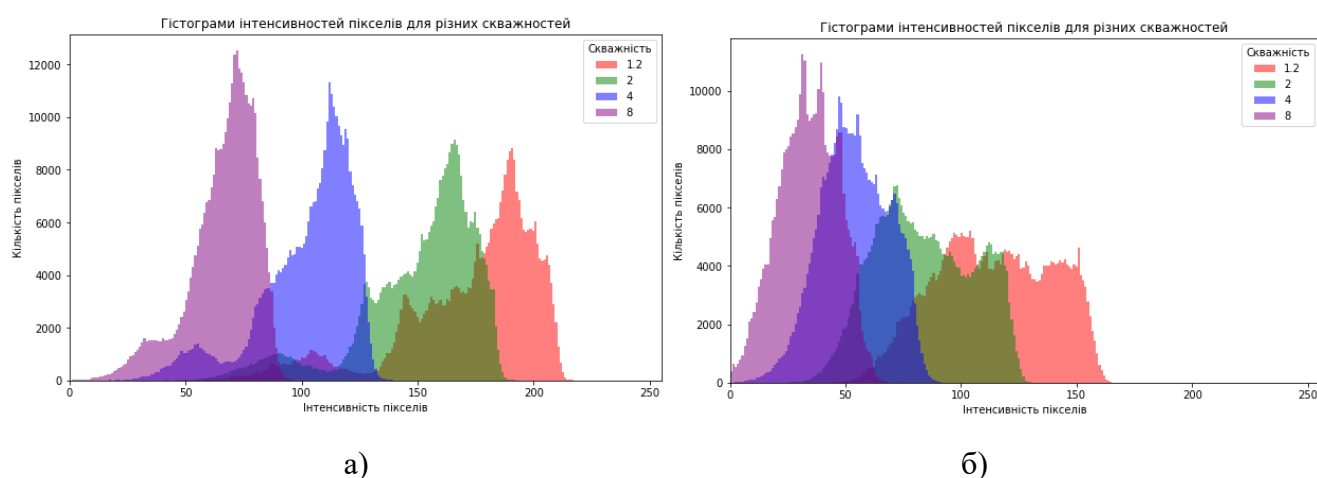


Рисунок 52 – Залежність розподілу інтенсивності пікселів від скважності при частоті модуляції $f = 1$ кГц на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм

Проаналізуємо рис. 51. Гістограми інтенсивності пікселів демонструють зміну в якості освітлення та рівні шуму при різних частотах модуляції. На низькій частоті 25 Гц розподіл широкий, що вказує на варіативність інтенсивності пікселів та зниження якості освітлення. Піки низькі та широкі, з'являється більша кількість пікселів з високою інтенсивністю, що може бути пов'язано з збільшенням шуму.

При збільшенні частоти до 50 Гц та 100 Гц спостерігається високий і вузький пік, який свідчить про високу однорідність освітлення з мінімальним рівнем шуму. Це вказує на стабільність освітлення і може бути ідеальним для застосувань, де необхідна консистентна інтенсивність.

На високій частоті 1 кГц спостерігається усереднений розподіл з високим і вузьким піком, з більш гладкими краями, що також говорить про однорідність освітлення з мінімальним рівнем шумів.

Загалом, можна сказати, що оптимальна частота модуляції для забезпечення якісного освітлення і мінімізації шуму - 1 кГц. Зі зменшенням частоти якість освітлення погіршується, з'являється більше шуму, і розподіл інтенсивностей стає ширшим та менш передбачуваним.

Проведемо аналіз гістограм на рис. 52. Гістограми показують, що зі зменшенням скважності імпульсу (з великих значень до менших) спостерігається розширення розподілу інтенсивностей і зменшення піків, а також зміщення в сторону більшої інтенсивності пікселів, що вказує на покращення якості освітлення та зниження шуму. Порівнюючи гістограми на різних довжинах хвиль випромінювання, бачимо, що на довжині 850 нм графіки більш круті, з вузькими та чіткими піками, а також розподіл зі зміною скважності займає більший діапазон інтенсивностей. Оптимальні умови для ІЧ-підсвічування для цієї конкретної камери досягаються при скважності близько 2, оскільки це забезпечує найкращу однорідність і мінімальний шум.

Аналіз статистичних показників (стандартного відхилення, ентропії, співвідношення сигнал/шум, динамічного діапазону, середнього) на рис. 53 показує про незначну залежність цих параметрів від частоти модуляції. Однак, аналізуючи рис. 54, можемо однозначно говорити про практично лінійну залежність цих параметрів від скважності імпульсу.

Зі збільшенням скважності зменшується значення кожного з аналізованих показників. Це може свідчити про те, що зі збільшенням скважності імпульсу зображення стає менш контрастним та менш насиченим.

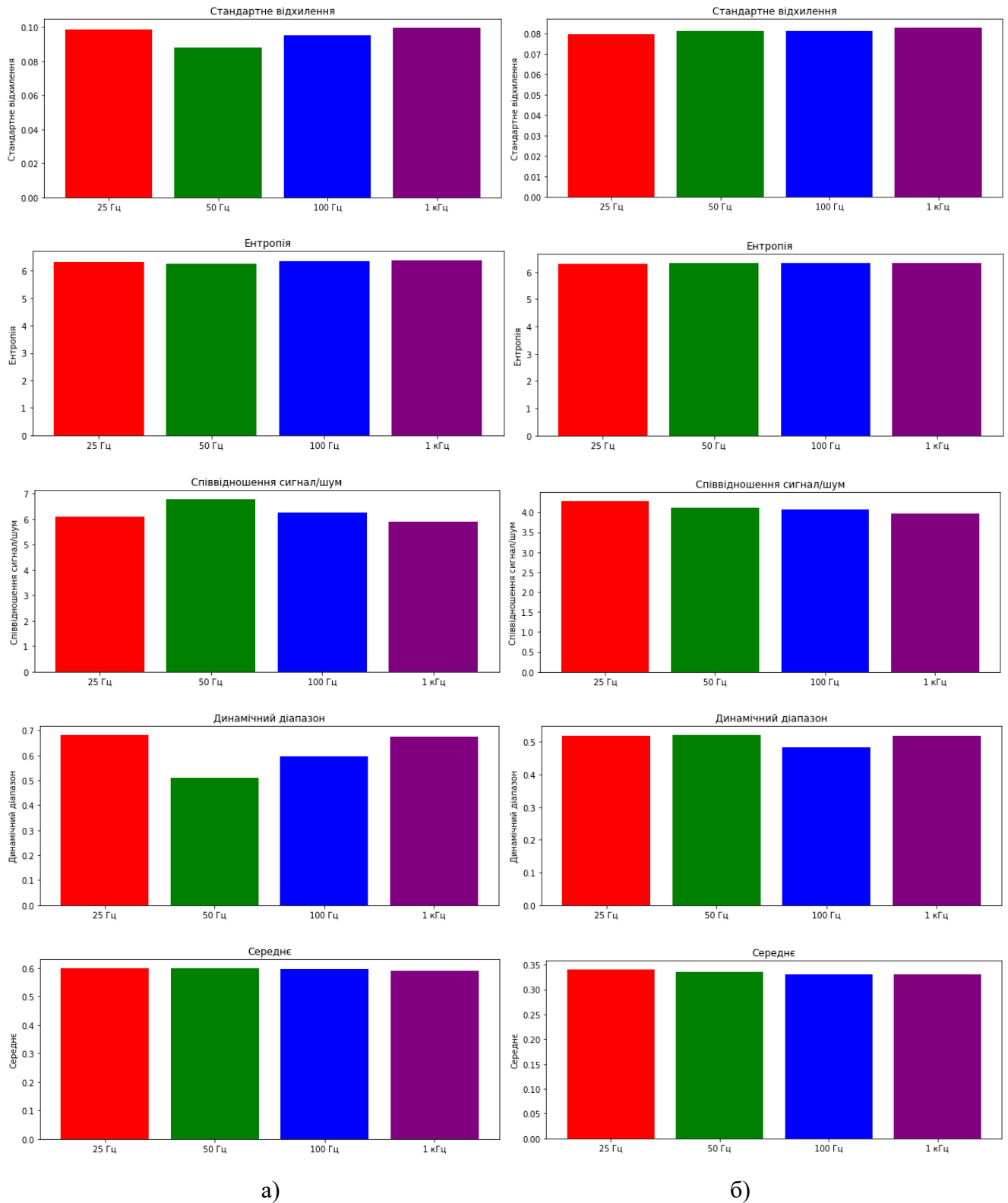


Рисунок 53 – Залежність статистичних параметрів від частоти модуляції при скважності $Q = 2$ на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм

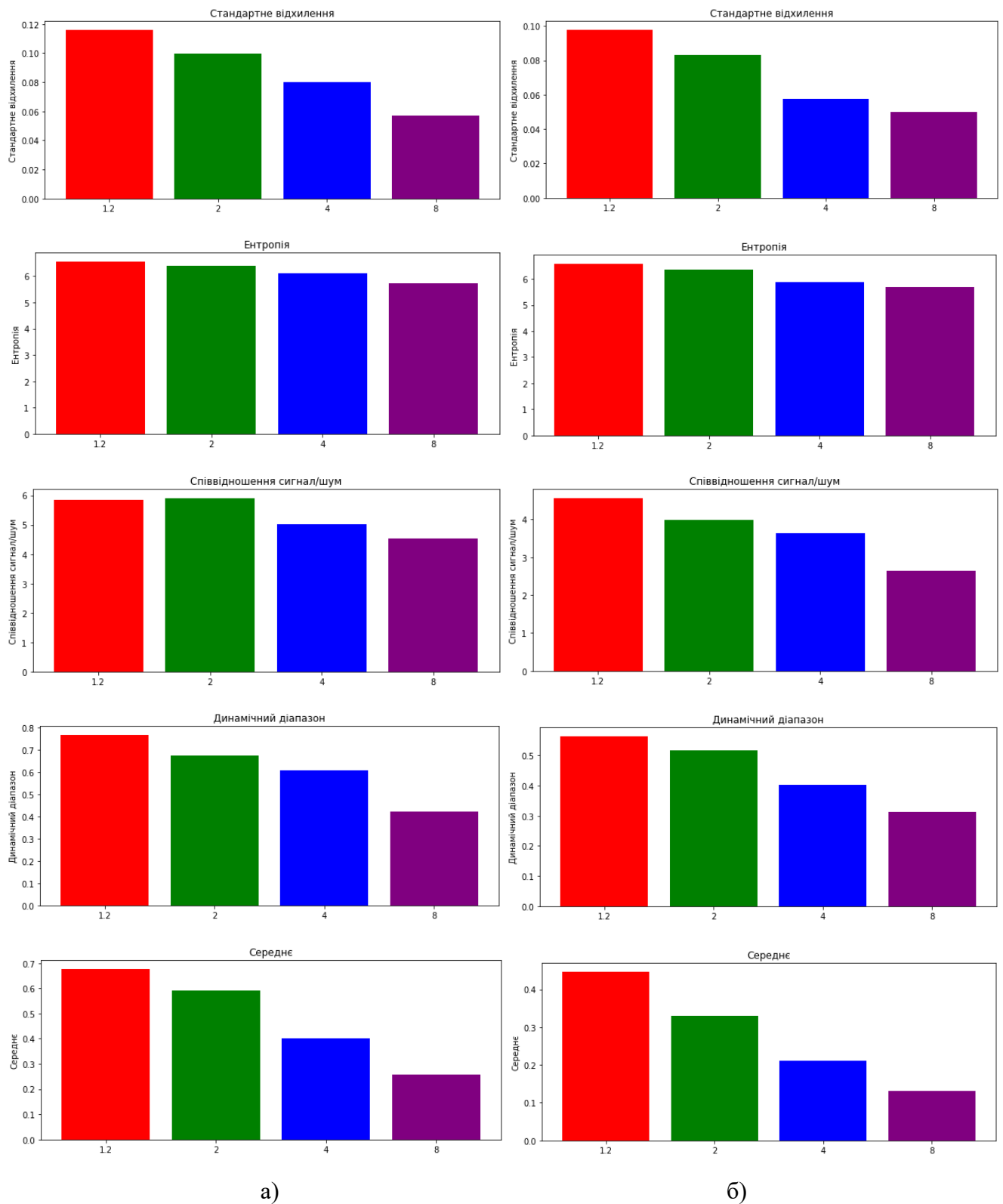


Рисунок 54 – Залежність статистичних параметрів від скважності при частоті модуляції $f = 1$ кГц на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм

Стандартне відхилення показує розсіювання інтенсивності пікселів від середнього значення – коли воно зменшується, це означає, що пікселі мають більш однорідну інтенсивність. Ентропія є мірою невизначеності або інформаційної вмістивності зображення; нижча ентропія означає меншу інформативність. Співвідношення сигнал/шум показує, наскільки сигнал відрізняється від фонового шуму; вище значення вказує на кращу видимість сигналу. Динамічний діапазон відображає різницю між найтемнішими та найсвітлішими елементами зображення; більший діапазон означає більшу кількість доступних інтенсивностей.

Таким чином, зменшення значень цих параметрів зі збільшенням скважності може вказувати на зниження якості зображення. Зображення стає менш динамічним та може втрачати деталі, особливо в областях з низькою контрастністю. Це може бути критично для додатків, де важлива висока роздільна здатність та точність відтворення деталей, як-от у нічному баченні або медичній візуалізації.

Загальний характер параметрів залишається незмінним – більшими значеннями за всіх змінних параметрів володіють зображення з ІЧ-підсвічуванням на довжині хвилі 850 нм.

Коефіцієнт кореляції між двома зображеннями $r = 0,5461$ (рис. 55) є позитивним, що вказує на помірну ступінь лінійної залежності між значеннями інтенсивностей двох зображень. Це означає, що хоча зображення пов'язані, зв'язок не є досконалим, і є інші фактори, які можуть впливати на інтенсивність кожного з них.

На графіку кореляційна функція досягає свого максимуму при певному зсуві, що може вказувати на найкраще вирівнювання між двома зображеннями. Зсув, при якому досягається пік кореляції, може вказувати на те, як одне зображення має бути переміщене відносно іншого для досягнення найкращої відповідності.

Висновок з цього аналізу може бути такий: наявність помірної кореляції між зображеннями на довжинах хвиль 850 та 940 нм при однакових скважностях і частотах модуляції може свідчити про те, що зображення мають схожі особливості або патерни освітлення, хоча вони не є ідентичними.

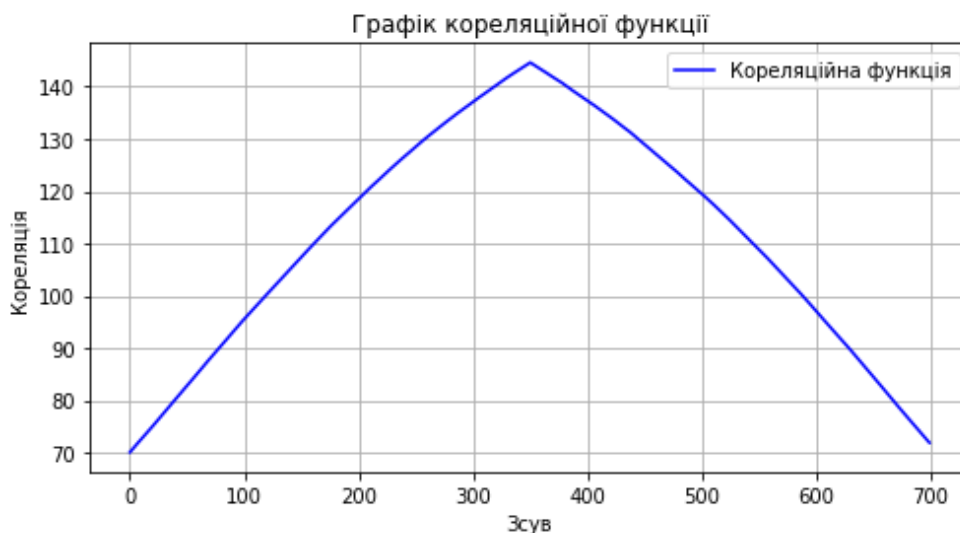


Рисунок 55 – Кореляційна функція двох зображень: 1-го – на довжині хвиль випромінювання 850 нм при скважності $Q = 2$ на частоті модуляції $f = 1$ кГц; 2-го – на довжині хвиль випромінювання 940 нм при скважності $Q = 2$ на частоті модуляції $f = 1$ кГц; коефіцієнт кореляції $r = 0,5461$

Така інформація може бути корисною при виборі параметрів для системи зображень, яка використовує ці довжини хвиль для різних застосувань, наприклад, у системах нічного бачення або в медичних зображеннях.

Проведемо візуальний аналіз зображень на скважності $Q = 2$ за змінної частоти, та на частоті 1 кГц за змінної скважності для двох довжин хвиль випромінювання. Суб'єктивна візуальна оцінка якості зображень, наведених на рис. 56-57, показує, що залежність якості зображень від частоти модуляції імпульсу, що подається на ІЧ-світлодіод, мінімальна. Протилежну залежність ми спостерігаємо, аналізуючи рис. 58-59.

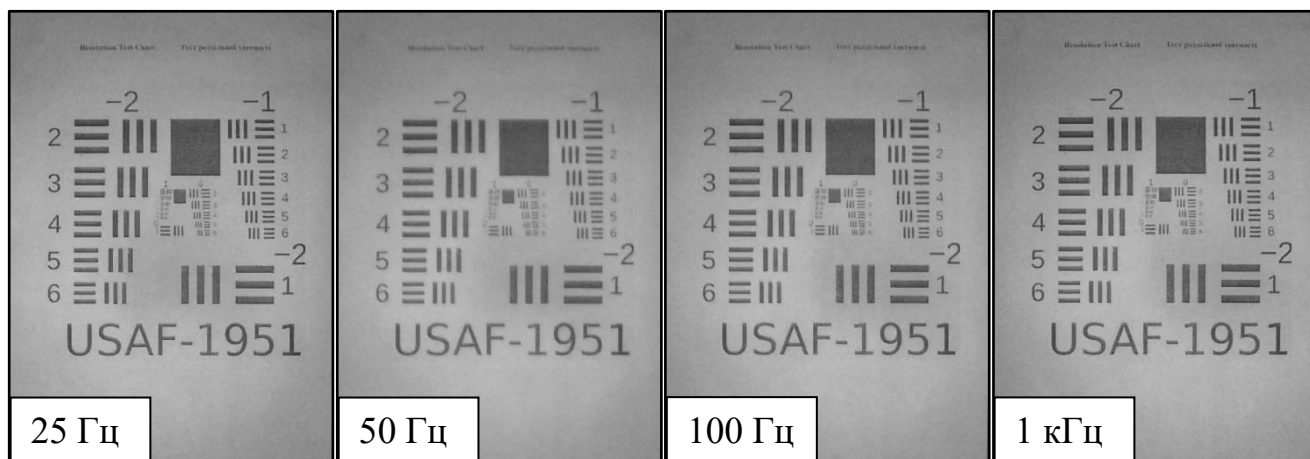


Рисунок 56 – Зображення тестової мішені за різних частот модуляції імпульсу, що подається на ІЧ-світлодіод за скважності $Q = 2$ на довжині хвилі 850 нм

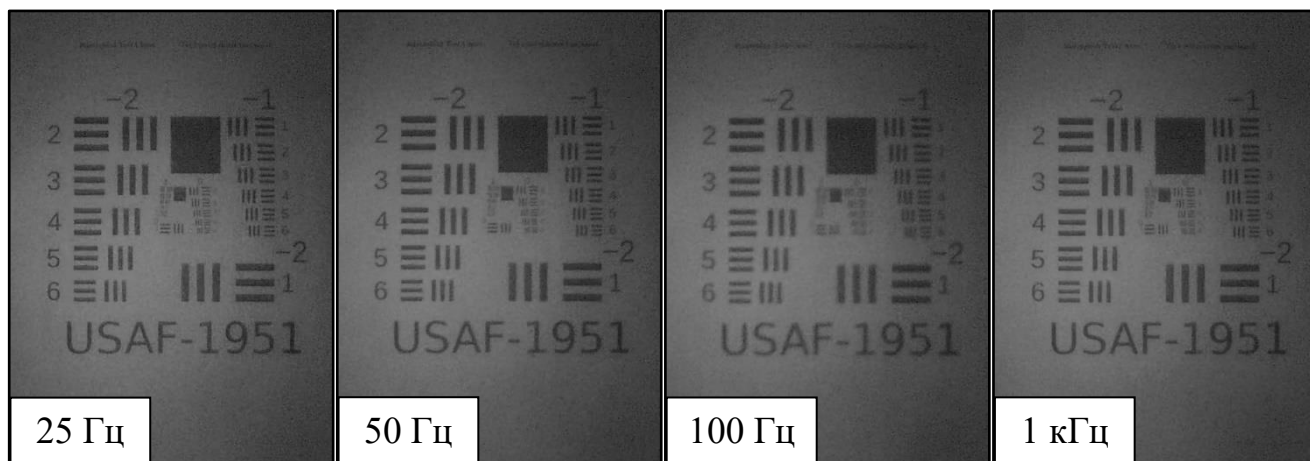


Рисунок 57 – Зображення тестової мішені за різних частот модуляції імпульсу, що подається на ІЧ-світлодіод за скважності $Q = 2$ на довжині хвилі 940 нм

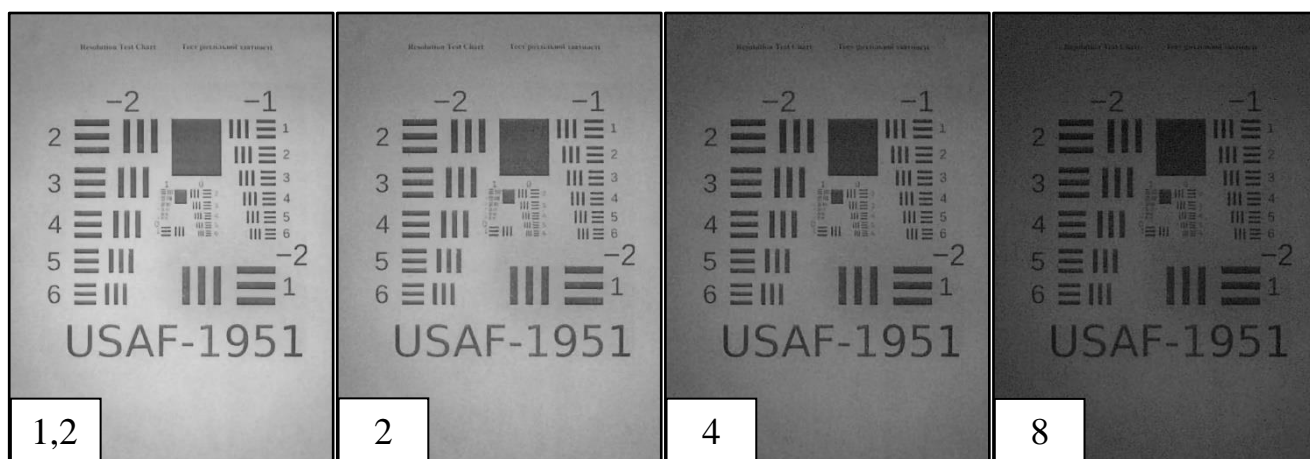


Рисунок 58 – Зображення тестової мішені за різної скважності імпульсу, що подається на ІЧ-світлодіод на частоті 1 кГц на довжині хвилі 850 нм

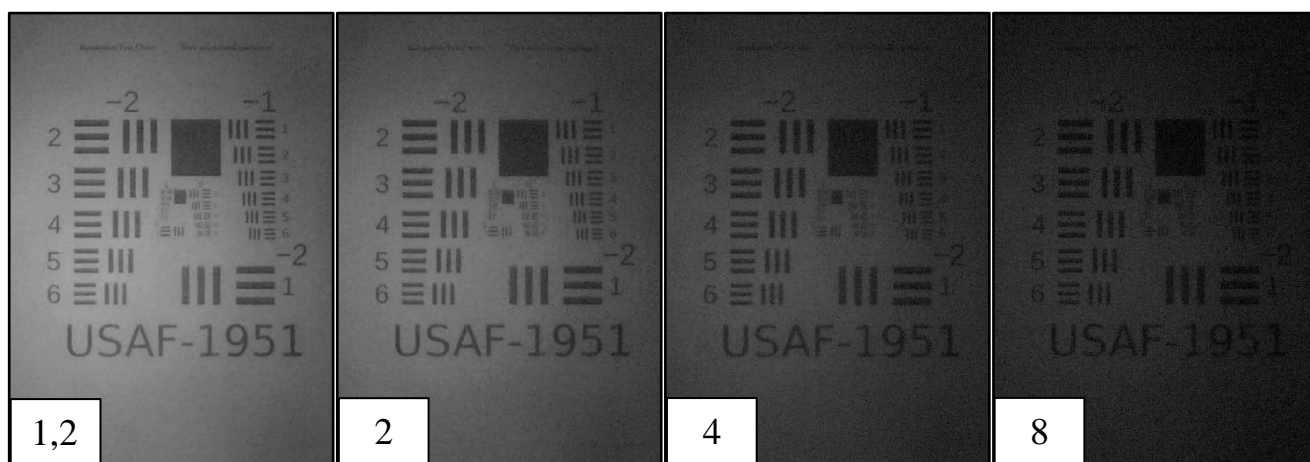


Рисунок 59 – Зображення тестової мішені за різної скважності імпульсу, що подається на ІЧ-світлодіод на частоті 1 кГц на довжині хвилі 940 нм

Бачимо, що яскравість зображень, зашумленість та їх деталізація сильно залежить від показника скважності імпульсу, який подається на активне ІЧ-підсвічування. Порівняння за різними довжинами хвиль випромінювання говорить

про більшу інформативність, якість, деталізацію зображень, виконаних за допомогою ПЧ-світлодіода на довжині хвилі 850 нм.

Висновки до розділу: Дослідження показало, що збільшення частоти модуляції сприяє покращенню контрастності зображення, особливо на довжині хвилі 850 нм. Однак, на довжині хвилі 940 нм ця тенденція не спостерігалась так явно. Аналіз показав лінійну залежність яскравості від скважності імпульсу на обох довжинах хвиль. На довжині хвилі 850 нм спостерігалось збільшення різкості зі зменшенням скважності імпульсу, тоді як на довжині хвилі 940 нм було протилежне спостереження. Аналіз статистичних параметрів, таких як стандартне відхилення, ентропія, співвідношення сигнал/шум та динамічний діапазон, показав, що зі збільшенням скважності імпульсу ці параметри зменшуються, що свідчить про зниження якості зображення. Помірна кореляція між зображеннями на довжинах хвиль 850 та 940 нм при однакових скважностях і частотах модуляції свідчить про наявність схожих особливостей або патернів освітлення, хоча вони не є ідентичними. Візуальне сприйняття інформації з отриманих зображень корелює з кількісними показниками параметрів зображення, що були отримані в ході програмної обробки зображень. Ця інформація може бути корисною при виборі параметрів для систем зображень, що використовують ці довжини хвиль.

4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

4.1 Опис ідеї проєкту

Таблиця 1. Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка системи відеоспостереження за об'єктами з оптимізованим активним ІЧ-підсвічуванням в умовах низької освітленості	1. Охоронні системи	Покращена якість зображення при низькій освітленості
	2. Моніторинг дикої природи	Підвищення ефективності нічного моніторингу
	3. Відеоспостереження в нічний час доби	Зменшення втрати деталей у темряві

Таблиця 2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	Конкурент			
1	Економічні	-	-	-	-	-
2	Технічні	Сумісність з різними типами камер	Сумісність з різними типами камер		+	
3	Надійності	Довговічність компонентів	Довговічність компонентів		+	
4	Технологічні	Інноваційність технологій обробки зображень	Не передбачено			+
5	Ергономічні	-	-	-	-	-
6	Органолептичні	-	-	-	-	-
7	Естетичні	-	-	-	-	-
8	Транспортабельності	Вартість логістики та доставки	Вартість логістики та доставки			+
9	Екологічності	Енергоефективність	Не передбачено			+
10	Безпеки	Стійкість до зовнішніх впливів	Стійкість до зовнішніх впливів		+	

4.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

Таблиця 3. Технологічна здійсненність ідеї проєкту.

№ п/п	Ідея проєкту	Технологія її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Розробка системи відеоспостереження з оптимізованим активним ІЧ-підсвічуванням	Впровадження активних ІЧ-підсвічувачів з оптимізованими параметрами в системи отримання зображення	Наявна	Доступно
Обрана технологія реалізації ідеї проєкту: Впровадження активних ІЧ-підсвічувачів з оптимізованими параметрами в системи отримання зображення				

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Таблиця 4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту.

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	4
2	Загальний обсяг продаж, ум.од./рік	50000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Постійно зростаючий, через підвищений попит на технології безпеки
4	Наявність обмежень для входу	Високі, включають потребу у великих інвестиціях та технологічній експертизі
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Строгі, включають вимоги до якості, безпеки, та екологічності
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30%

Таблиця 5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту.

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Підвищення безпеки на об'єктах	Охоронні агенції	Шукають надійність і тривалу безвідмовну роботу	Висока якість зображення, довговічність, надійність
2	Моніторинг у складних умовах освітлення	Промислові підприємства, склади	Потребують високу якість зображення в темряві	Якість зображення в низькому світлі, стійкість до умов навколишнього середовища
3	Спеціалізовані застосування (наприклад, нічний нагляд за дикою природою)	Наукові та дослідницькі організації	Шукають високу точність і спеціалізовані функції	Висока точність зображення, додаткові функції аналітики

Таблиця 6. Фактори загроз.

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Технологічні зміни	Швидкий розвиток технологій може призвести до застарілості продукту	Постійне оновлення та інновації в продукті, інвестиції в дослідження та розробку
2	Конкуренція	Поява нових конкурентів з кращими рішеннями	Агресивна маркетингова стратегія, фокус на унікальних властивостях продукту
3	Кібербезпека	Хакерські атаки або витоки даних	Зміцнення заходів кібербезпеки, постійне оновлення захисних систем

Таблиця 7. Фактори можливостей.

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту на безпеку	Збільшення попиту на продукти безпеки	Розробка маркетингових кампаній, спрямованих на підвищення безпеки
2	Цифрова трансформація	Інтеграція з сучасними цифровими технологіями	Розробка і впровадження нових цифрових продуктів та послуг
3	Глобалізація ринку	Розширення на міжнародні ринки	Створення глобальної мережі дистрибуції та маркетингу
4	Розвиток технологій	Використання новітніх технологій для покращення продукту	Інвестування в наукові дослідження та розробку

Таблиця 8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку.

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентноспроможною)
1. Тип конкуренції – олігополія	Декілька великих гравців контролюють ринок	Фокус на інновації та диференціацію продукту, партнерства для розширення ринку
2. За рівнем конкурентної боротьби – національний	Висока конкуренція, особливо на ціну та якість	Агресивна цінова політика, підвищення якості продукту
3. За галузевою ознакою – вузькогалузева	Галузь безпеки та відеоспостереження	Спеціалізація на певних галузевих рішеннях, наголос на галузеві інновації
4. За видами товарів – товарно-інноваційна	Інноваційні продукти проти традиційних рішень	Розробка унікальних функцій та характеристик продукту
5. За характером конкурентних переваг – технологічна	Технологічні переваги, бренд, мережа дистрибуції	Вкладання в бренд і технології, розширення каналів продажу
6. За інтенсивністю – інноваційна	Середньо-висока, з акцентом на інноваційність та маркетинг	Активний маркетинг, постійне оновлення продукту, використання цифрових каналів

Таблиця 9. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності.

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Якість зображення	Використання передових ІЧ-технологій для забезпечення високої якості зображення в нічний час
2	Інноваційність	Розробка унікальних алгоритмів обробки зображень та функцій, які відрізняються від стандартних рішень
3	Вартість	Ефективне управління виробництвом та логістикою для забезпечення конкурентоспроможної ціни
4	Енергоефективність	Розробка продукту з низьким споживанням енергії, що зменшує експлуатаційні витрати
5	Надійність та довговічність	Використання високоякісних матеріалів та компонентів для забезпечення тривалого терміну служби

Таблиця 10. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «назва проекту».

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Якість зображення	18						+	
2	Інноваційність	17					+		
3	Вартість	15				+			
4	Енергоефективність	18						+	
5	Надійність та довговічність	18					+		

Таблиця 11. SWOT- аналіз стартап-проекту.

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Висока якість зображення в нічний час - Енергоефективність продукту - Надійність та довговічність - Інноваційні технології обробки зображень 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Обмежені ресурси для масштабування - Відсутність широкої ринкової впізнаваності - Обмежений бюджет на маркетинг і рекламу
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Розвиток суміжних продуктів і послуг - Розширення на міжнародні ринки - Зростання попиту на рішення для безпеки 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Швидкий розвиток конкурентних технологій - Зміни у регуляторних вимогах - Стратегії ціноутворення конкурентів

Таблиця 12. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту.

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Прямі продажі через власний веб-сайт та онлайн-маркетплейси	70%	6-12 місяців
2	Партнерство з охоронними агенціями та інсталяційними компаніями	40%	12-18 місяців
3	Контрактна виробництво для великих брендів у галузі безпеки	20%	18-24 місяці
4	Краудфандингова кампанія для залучення інвестицій і ринкової підтримки	40%	3-6 місяців

4.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту

Таблиця 13. Вибір цільових груп потенційних споживачів.

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Охоронні агенції і служби безпеки	Висока	Високий	Висока	Середня
2	Промислові підприємства	Середня	Середній	Середня	Складна
3	Муніципальні установи	Висока	Середній	Висока	Складна
4	Приватні домогосподарства	Низька	Низький	Низька	Проста
5	Роздрібні магазини та торгові центри	Середня	Середній	Висока	Середня
Які цільові групи обрано: 1 та 2					

Таблиця 14. Визначення базової стратегії розвитку.

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентноспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Розширення лінійки продуктів	Диференціація продукту	Інноваційність, висока якість зображення	Розвиток та інновації в продукті
2	Партнерство з охоронними агенціями	Фокус на B2B сегменті	Надійність, технічна підтримка	Стратегічне партнерство
3	Міжнародне розширення	Глобалізація та вхід на нові ринки	Адаптація до місцевих умов, міжнародна мережа	Глобальна експансія

Таблиця 15. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки.

№ п/п	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
	Ні, на ринку вже є схожі продукти	Шукати нових споживачів через інноваційність та вищу якість продукту	Ні, основний акцент на інноваційні рішення та покращення якості	Диференціація продукту

Таблиця 16. Визначення стратегії позиціонування.

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентноспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту (три ключових)
	Висока якість зображення в нічний час	Розвиток та інновації	Інноваційність, висока якість зображення	Інновації, надійність, висока якість

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Таблиця 17. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару.

№ п/п	Потреба	Вигода, яку товар пропонує	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Висока якість зображення в нічний час	Висока роздільна здатність та чітке зображення	Краща якість зображення при низькому рівні освітлення
2	Енергоефективність	Низьке споживання енергії	Економія енергії порівняно з іншими продуктами
3	Легкість використання та інтеграції	Простота установки та сумісність з існуючими системами	Простіше в інтеграції та управлінні

Таблиця 18. Опис трьох рівнів моделі товару.

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Ідея створення системи нічного відеоспостереження з передовими ІЧ-технологіями, спрямована на забезпечення високої якості зображення в умовах обмеженого освітлення. Ключові елементи: інноваційність, фокус на безпеку, використання передових технологій.
II. Товар у реальному виконанні	Фізичний продукт, включаючи дизайн, конструкцію, комплектуючі та програмне забезпечення. Складається з ІЧ-камер, обладнання для обробки зображень, інтерфейсу користувача та системи безпеки даних.
III. Товар із підкріпленням	Додаткові послуги та підтримка, які йдуть разом з товаром. Включає технічну підтримку, сервісне обслуговування, гарантії, програми навчання користувачів та маркетингові ініціативи для залучення клієнтів.
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентування технологій, унікальність характеристик	

Таблиця 19. Формування системи збуту.

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Довгострокові контракти з охоронними агенціями	Персоналізований продаж, технічна підтримка	Прямий	Прямі продажі через власний веб-сайт і представництва
2	Одноразові закупівлі промисловими підприємствами	Ефективна логістика, гнучкість угод	Прямий/Одноступінчатий	Дистриб'ютори та онлайн-платформи

Таблиця 20. Концепція маркетингових комунікацій.

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Охоронні агенції шукають надійні рішення	Професійні виставки, спеціалізовані видання, B2B веб-платформи	Надійність, висока якість зображення, інноваційність	Підкреслити технологічні переваги і надійність	Представлення успішних випадків використання у сфері безпеки
2	Промислові підприємства цінують ефективність	Індустріальні портали, журнали, конференції	Енергоефективність, довговічність, простота в експлуатації	Висвітлити економічні переваги і простоту інтеграції	Демонстрація зниження витрат і легкості використання

4.6 Висновки

На основі аналізу таблиць, ідея стартап-проєкту з системою нічного відеоспостереження з оптимізованим ІЧ-підсвічуванням виявляється перспективною та конкурентоспроможною. Проєкт зосереджується на інноваційних технологіях, які забезпечують високу якість зображення, енергоефективність та надійність. Він відрізняється від конкурентів завдяки своїм унікальним характеристикам та додатковим послугам. Ринкова стратегія передбачає диференціацію продукту, активне використання різних каналів збуту та ефективні маркетингові комунікації для досягнення ключових цільових сегментів.

ВИСНОВКИ

В роботі було досліджено технічні аспекти ІЧ-підсвічування, включаючи спектральні характеристики КМОН-матриць та ІЧ-світлодіодів, алгоритмів отримання зображення з їх використанням, електричні параметри LED-драйверів, методики оцінки якості оптичних зображень. Значна увага приділена дослідженню енергетичної ефективності використання різних типів підсвічуючих ІЧ-світлодіодів, їх характеристикам, оптимізації налаштувань режимів для покращення якості зображення в умовах низької освітленості.

Експериментальна частина роботи продемонструвала, що частота модуляції та скважність імпульсу мають суттєвий вплив на якість зображення, зокрема на такі параметри, як яскравість, контраст, різкість та рівень шумів. Оптимізація цих параметрів може значно покращити візуальну якість зображень в системах нічного відеоспостереження.

В роботі проведено порівняння зображень, отриманих за різних довжин хвилі випромінювання ІЧ-світлодіодів. Результати показали відмінності в якості зображень на різних довжинах хвиль, що вказує на необхідність детального підбору характеристик ІЧ-світлодіодів відповідно до типу матриці фотоприймального вузла, конкретних вимог до систем відеоспостереження за об'єктами в умовах низької освітленості.

Висновки з цієї роботи можуть бути використані для покращення проектування та розробки систем відеоспостереження, зокрема у підвищенні якості зображень у системах нічного відеоспостереження. Оптимізація параметрів ІЧ-підсвічування дозволить створювати більш ефективні та надійні системи безпеки та моніторингу. Дослідження розширює розуміння впливу параметрів ІЧ-підсвічування на якість зображення, що є важливим внеском у наукову сферу в області оптичних систем та обробки зображень. Результати дослідження відкривають нові можливості для подальших досліджень у сфері оптимізації систем нічного відеоспостереження, а також застосування ІЧ-технологій у різних галузях, включаючи медичну візуалізацію та дистанційне зондування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Edmund Optics. Imaging Optics Resource Guide. Режим доступу URL: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/industry-expertise/imaging-optics/imaging-resource-guide/> (дата звернення: [23.10.2023]).
2. Waltham, N. (2013). CCD and CMOS sensors. In: Huber, M.C.E., Pauluhn, A., Culhane, J.L., Timothy, J.G., Wilhelm, K., Zehnder, A. (eds) // Observing Photons in Space. / ISSI Scientific Report Series, vol 9. Springer, New York, NY. Режим доступу URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7804-1_23
3. Teledyne Photometrics. Camera Basics / Educational Resources. Режим доступу URL: <https://www.photometrics.com/learn/camera-basics> (дата звернення: [15.11.2023]).
4. Fosco (Fiber Optics for Sale co.). Photodetector Performance Parameters. Режим доступу URL: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/photodetector-performance-parameters/> (дата звернення: [12.11.2023]).
5. Твердотільна електроніка : підручник / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко ; за заг. ред. Ю. І. Якименка. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – 484 с. – Бібліогр.: с. 476–477. – 300 пр.
6. Technical note. Si Photodiodes / Hamamatsu Photonics K.K., Solid State Division // Cat. No KSPD9001 E03 Oct. 2023 DN. Режим доступу URL: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/si_pd_kspd9001e.pdf (дата звернення: [05.12.2023])
7. OSRAM SFH 4715S. Datasheet / ams-Osram AG // Premstaetten, Austria. Режим доступу URL: <https://look.ams-osram.com/m/1ce4473eb47f235a/original/SFH-4715S.pdf> (дата звернення: [25.10.2023])
8. OSRAM SFH 4725S. Datasheet / ams-Osram AG // Premstaetten, Austria. Режим доступу URL: <https://look.ams-osram.com/m/576da17be1796a90/original/SFH-4725S.pdf> (дата звернення: [25.10.2023])

9. Steve Darmadi, “Strobed IR Illumination for Image Quality Improvement in Surveillance Cameras,” Master thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2018.
10. Saffih, Fayçal. (2005). Foveated Sampling Architectures for CMOS Image Sensors. Режим доступа URL: https://www.researchgate.net/publication/242404501_Foveated_Sampling_Architectures_for_CMOS_Image_Sensors?enrichId=rgreq-bc31a507602252e9867c8c9d4ba268dd-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI0MjQwNDUwMTtBUzoxMDI3Nm1OTc5MjY0MTFAMTQwMTUxMjE2MDEyNw%3D%3D&el=1_x_2&esc=publicationCoverPdf (дата звернення: [26.11.2023]).
11. The TechGeeks. E1-Outdoor-PoE Reolink 4K 8MP PTZ PoE. Режим доступа URL: <https://thetechgeeks.com/products/e1-outdoor-poe-reolink-4k-8mp-ptz-poe-camera-with-auto-tracking-and-smart-detection> (дата звернення: [26.11.2023]).
12. Cudy. AC1200 Wi-Fi Router. Режим доступа URL: <http://www.cudytech.com/productinfo/2069184.html> (дата звернення: [26.11.2023]).
13. National Instruments. NI ELVIS II. Режим доступа URL: <https://www.ni.com/en-us/support/model.ni-elvis-ii.html> (дата звернення: [26.11.2023]).
14. NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II Series (NI ELVISTM II Series) User Manual / National Instruments Corporation // Austin, Texas. June 2011 374629C-01. Режим доступа URL: https://electrical.engineering.unt.edu/sites/default/files/NI_ELVIS_II.pdf (дата звернення: [02.12.2023]).
15. OSRAM SFH 4556. Datasheet / OSRAM Opto Semiconductors GmbH // Leibnizstraße 4, D-93055 Regensburg, December 2015.
16. IR928-6C-F Technical Data Sheet. Everlight Electronics Co., Ltd. zhouhong // Device No : CDIR-092-007 Prepared date:2006/12/21

ДОДАТОК А

Лістинг програми для аналізу отриманих зображень

A.1 Аналіз яскравості, контрасту, різкості та шумів в залежності від частоти

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from skimage.io import imread
from skimage.color import rgb2gray
from skimage.filters import laplace
# Функції для аналізу зображень
def calculate_brightness(image):
    return np.mean(image)
def calculate_contrast(image):
    return image.max() - image.min()
def calculate_sharpness(image):
    laplacian = laplace(image)
    return laplacian.var()
def calculate_noise(image):
    return np.std(image)
# Шляхи до зображень
image_paths = [r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 25
Hz (2).jpg',
               r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 50 Hz
(2).jpg',
               r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 100 Hz
(2).jpg',
               r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz
(2).jpg']
frequencies = ['25 Гц', '50 Гц', '100 Гц', '1 кГц']
# Аналіз зображень
results = []
for path in image_paths:
    image = imread(path)
    if image.ndim == 3:
        image = rgb2gray(image)
    brightness = calculate_brightness(image)
    contrast = calculate_contrast(image)
    sharpness = calculate_sharpness(image)
    noise = calculate_noise(image)
```

```

    results.append((brightness, contrast, sharpness, noise))
# Візуалізація результатів
# Мітки та кольори для гістограм
labels = ['Яскравість', 'Контраст', 'Різкість', 'Шум']
colors = ['red', 'green', 'blue', 'purple']
# Створення та збереження гістограм для кожного параметра
for i, label in enumerate(labels):
    plt.figure(figsize=(10, 4))
    plt.bar(frequencies, [result[i] for result in results])
    plt.title(f'{label} в залежності від частоти')
    plt.ylabel(label)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

A.2 Аналіз яскравості, контрасту, різкості та шумів в залежності від скважності

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from skimage.io import imread
from skimage.color import rgb2gray
from skimage.filters import laplace
# Функції для аналізу зображень
def calculate_brightness(image):
    return np.mean(image)
def calculate_contrast(image):
    return image.max() - image.min()
def calculate_sharpness(image):
    laplacian = laplace(image)
    return laplacian.var()
def calculate_noise(image):
    return np.std(image)
# Шляхи до зображень
image_paths = [r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1
kHz (1.2).jpg',
               r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz
(2).jpg',
               r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz
(4).jpg',

```



```

r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz
(8).jpg']
frequencies = ['1.2', '2', '4', '8']
# Аналіз зображень
results = []
for path in image_paths:
    image = imread(path)
    if image.ndim == 3:
        image = rgb2gray(image)
    brightness = calculate_brightness(image)
    contrast = calculate_contrast(image)
    sharpness = calculate_sharpness(image)
    noise = calculate_noise(image)
    results.append((brightness, contrast, sharpness, noise))
# Візуалізація результатів
# Мітки та кольори для гістограм
labels = ['Яскравість', 'Контраст', 'Різкість', 'Шум']
colors = ['red', 'green', 'blue', 'purple']
# Створення та збереження гістограм для кожного параметра
for i, label in enumerate(labels):
    plt.figure(figsize=(10, 4))
    plt.bar(frequencies, [result[i] for result in results])
    plt.title(f'{label} в залежності від скважності')
    plt.ylabel(label)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

A.3 Аналіз розподілу інтенсивності пікселів в залежності від частоти

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from skimage.io import imread
# Шляхи до зображень і відповідні частоти
image_paths = [r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 25
Hz (2).jpg',
                r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 50 Hz
(2).jpg',
                r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 100 Hz
(2).jpg',

```

```

r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz
(2).jpg']
frequencies = ['25 Гц', '50 Гц', '100 Гц', '1 кГц']
colors = ['red', 'green', 'blue', 'purple'] # Кольори для візуалізації
кожної частоти
# Створення гістограми
plt.figure(figsize=(10, 6))
for path, freq, color in zip(image_paths, frequencies, colors):
    image = imread(path)
    if image.ndim == 3:
        # Якщо зображення кольорове, використовуйте один канал (наприклад,
червоний)
        image = image[:, :, 0]
        plt.hist(image.ravel(), bins=256, range=[0, 255], color=color,
alpha=0.5, label=freq, density=False)
plt.title('Гістограми інтенсивностей пікселів для різних частот')
plt.xlabel('Інтенсивність пікселів')
plt.ylabel('Кількість пікселів')
plt.legend(title='Частота підсвічування')
plt.xlim(0, 255)
plt.show()

```

A.4 Аналіз розподілу інтенсивності пікселів в залежності від скважності

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from skimage.io import imread
# Шляхи до зображень і відповідні скважності
image_paths = [r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1
kHz (1.2).jpg',
                r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz
(2).jpg',
                r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz
(4).jpg',
                r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz
(8).jpg']
frequencies = ['1.2', '2', '4', '8']
colors = ['red', 'green', 'blue', 'purple'] # Кольори для візуалізації
кожної частоти

```

```

# Створення гістограми
plt.figure(figsize=(10, 6))
for path, freq, color in zip(image_paths, frequencies, colors):
    image = imread(path)
    if image.ndim == 3:
        # Якщо зображення кольорове, використовуйте один канал (наприклад,
        червоний)
        image = image[:, :, 0]
    plt.hist(image.ravel(), bins=256, range=[0, 255], color=color,
alpha=0.5, label=freq, density=False)
plt.title('Гістограми інтенсивностей пікселів для різних скважностей')
plt.xlabel('Інтенсивність пікселів')
plt.ylabel('Кількість пікселів')
plt.legend(title='Скважність')
plt.xlim(0, 255)
plt.show()

```

А.5 Аналіз статистичних параметрів в залежності від частоти

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from skimage.io import imread
from skimage.color import rgb2gray
from skimage.measure import shannon_entropy
def calculate_snr(image):
    """Розрахунок співвідношення сигнал/шум для зображення."""
    mean_signal = np.mean(image)
    noise = np.std(image)
    return mean_signal / noise if noise != 0 else 0
def analyze_image(image_path):
    """Аналіз зображення та обчислення статистичних параметрів."""
    image = imread(image_path)
    if image.ndim == 3:
        image = rgb2gray(image) # Конвертація в сірі тони, якщо зображення
        кольорове
    std_dev = np.std(image) # Стандартне відхилення
    entropy = shannon_entropy(image) # Ентропія
    snr = calculate_snr(image) # Співвідношення сигнал/шум
    dynamic_range = image.max() - image.min() # Динамічний діапазон

```

```

mean = np.mean(image)                # Середнє значення
median = np.median(image)            # Медіана
return std_dev, entropy, snr, dynamic_range, mean, median
# Шляхи до зображень та відповідні частоти
image_paths = [r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 25
Hz (2).jpg',
               r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 50 Hz
(2).jpg',
               r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 100 Hz
(2).jpg',
               r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz
(2).jpg']
frequencies = ['25 Гц', '50 Гц', '100 Гц', '1 кГц']
# Аналіз зображень
results = [analyze_image(path) for path in image_paths]
results_transposed = list(zip(*results))
# Мітки та кольори для гістограм
labels = ['Стандартне відхилення', 'Ентропія', 'Співвідношення сигнал/шум',
'Динамічний діапазон', 'Середнє', 'Медіана']
colors = ['red', 'green', 'blue', 'purple']
# Створення та збереження гістограм для кожного параметра
for i, label in enumerate(labels):
    plt.figure(figsize=(10, 4))
    plt.bar(frequencies, results_transposed[i], color=colors)
    plt.title(label)
    plt.ylabel(label)

plt.tight_layout()
plt.close()

```

A.6 Аналіз статистичних параметрів в залежності від скважності

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from skimage.io import imread
from skimage.color import rgb2gray
from skimage.measure import shannon_entropy
def calculate_snr(image):
    """Розрахунок співвідношення сигнал/шум для зображення."""

```

```

mean_signal = np.mean(image)
noise = np.std(image)
return mean_signal / noise if noise != 0 else 0
def analyze_image(image_path):
    """Аналіз зображення та обчислення статистичних параметрів."""
    image = imread(image_path)
    if image.ndim == 3:
        image = rgb2gray(image) # Конвертація в сірі тони, якщо зображення
        кольорове
    std_dev = np.std(image) # Стандартне відхилення
    entropy = shannon_entropy(image) # Ентропія
    snr = calculate_snr(image) # Співвідношення сигнал/шум
    dynamic_range = image.max() - image.min() # Динамічний діапазон
    mean = np.mean(image) # Середнє значення
    median = np.median(image) # Медіана
    return std_dev, entropy, snr, dynamic_range, mean, median
# Шляхи до зображень та відповідні скважності
image_paths = [r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1
kHz (1.2).jpg',
                r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz
(2).jpg',
                r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz
(4).jpg',
                r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz
(8).jpg']
frequencies = ['1.2', '2', '4', '8']
# Аналіз зображень
results = [analyze_image(path) for path in image_paths]
results_transposed = list(zip(*results))
# Мітки та кольори для гістограм
labels = ['Стандартне відхилення', 'Ентропія', 'Співвідношення сигнал/шум',
'Dинамічний діапазон', 'Середнє', 'Медіана']
colors = ['red', 'green', 'blue', 'purple']
# Створення та збереження гістограм для кожного параметра
for i, label in enumerate(labels):
    plt.figure(figsize=(10, 4))
    plt.bar(frequencies, results_transposed[i], color=colors)
    plt.title(label)
    plt.ylabel(label)

```

```
plt.tight_layout()
plt.close()
```

А.7 Аналіз кореляційної функції для двох зображень

```
import numpy as np
from skimage.io import imread
from scipy.stats import pearsonr
import matplotlib.pyplot as plt

def calculate_correlation(image_path1, image_path2):
    """Обчислення коефіцієнта кореляції між двома зображеннями."""
    image1 = imread(image_path1, as_gray=True)
    image2 = imread(image_path2, as_gray=True)
    # Переконаємося, що зображення мають однаковий розмір
    if image1.shape != image2.shape:
        raise ValueError("Зображення повинні бути однакового розміру")
    # Обчислення коефіцієнта кореляції
    correlation, _ = pearsonr(image1.ravel(), image2.ravel())
    return correlation

# Шляхи до зображень для порівняння
image_path1 = r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\850 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz (2).jpg'
image_path2 = r'C:\Users\ZenGuard\Desktop\Research\940 nm\IR LED Zoom 0 1 kHz (2).jpg'

# Обчислення коефіцієнта кореляції
correlation = calculate_correlation(image_path1, image_path2)
print(f"Коефіцієнт кореляції: {correlation}")

# Побудова графіку кореляційної функції
image1 = imread(image_path1, as_gray=True)[..., 0]
image2 = imread(image_path2, as_gray=True)[..., 0]
correlation_map = np.correlate(image1, image2, mode='same')
plt.figure(figsize=(8, 4))
plt.plot(correlation_map, color='blue', label='Кореляційна функція')
plt.xlabel('Зсув')
plt.ylabel('Кореляція')
plt.legend()
plt.title('Графік кореляційної функції')
plt.grid()
plt.show()
```