

УДК 351.81, 621.3.089, 621.397

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-03

**Берест В.Ю., Борисов О.В., Лупина Б.І.**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

## **АКТИВНЕ ІНФРАЧЕРВОНЕ ПІДСВІЧУВАННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ОПТИЧНОГО ЗОБРАЖЕННЯ В УМОВАХ НИЗЬКОЇ ОСВІТЛЕНОСТІ.**

*Досліджено вплив режимів підсвічування об'єкта джерелом ближнього інфрачервоного випромінювання на оптичні характеристики зображень, отриманих в умовах низького рівня або повної відсутності освітленості зони спостереження. Для отримання та аналізу зображень вибрано роботизовану відеокамеру моделі Reolink E1 Outdoor PoE, оснащену кремнієвою КМОН матрицею роздільної здатності 8 МП та вбудованими підсвічуючими прожекторами у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні. Проведено фіксацію зображень в специфічних умовах підсвічування об'єкта додатковим зовнішнім джерелом з врахуванням спектральної характеристики чутливості приймача для низки оптичних та електричних характеристик випромінювачів: стробованих параметрів живлення та підсвічувачів різної довжини хвилі. В якості додаткових зовнішніх освітлювачів експериментальної частини роботи використано світлодіоди з максимумом інтенсивності на довжині хвилі 850 нм (OSRAM, модель SFH 4556) та 940 нм (Everlight, модель IR928-6C-F). Для реалізації низки електричних режимів освітлювачів в роботі використано платформу для розробки віртуальних інструментів NI ELVIS II, розроблено власний драйвер світлодіодів на основі операційного підсилювача та транзисторного каскаду з регульованими параметрами імпульсного підсвічування: амплітудою, частотою, скважністю. Об'єктивну оцінку якості зображення тестової мішені Standard Layout Chart стандарту USAF 1951 в частині яскравості, контрастності, різкості, шумів виконано з використанням розробленого в роботі програмного пакету. Отримані результати показали, що режим додаткового підсвічування в ближньому інфрачервоному діапазоні має значні резерви в сенсі оптимізації енергоспоживання автономного джерела живлення системи відеоспостереження без суттєвої втрати якості отриманого зображення і функціональності камери. Встановлені кореляції параметрів зображення мають суттєве значення для вибору оптимальних режимів підсвічування з точки зору оптимізації енергоспоживання для комплектів з автономними джерелами живлення в залежності від конкретних застосувань, зокрема для мобільного комплексу відеоспостереження.*

**Ключові слова:** активне інфрачервоне підсвічування, напівпровідникові сенсори зображення, камера відеоспостереження.

**Постановка проблеми.** Отримання достатньо якісного зображення об'єкта в умовах його низької природної освітленості - традиційна задача в різноманітних галузях життєдіяльності: в наукових дослідженнях; системах відеонагляду за територією з вимогою цілодобової повнофункціональної експлуатації камер відеоспостереження, включаючи приховане виявлення та запобігання несанкціонованого доступу в нічний час; задачах ідентифікації рухомих об'єктів, наприклад, транспортних засобів за номерними знаками; розв'язанні подібних побутових задач оцінки сценарію розвитку подій всередині житлових приміщень і офісів, тощо [1-4]. Сучасні споживчі відеокамери пропонують високу чутливість матричних приймачів, високу роздільну здатність і частоту кадрів за прийнятною ціною [5-12]. Інтегровані функції програмного забезпечення надають можливість вибору: передавати відеопослідовність у режимі реального часу на реєстратор або мережевий комп'ютер чи зберігати інформацію безпосередньо на елементі пам'яті камери, роблячи їх використання портативним.

Виклики останнього періоду критично розширили сферу експлуатації подібних систем в Україні в індивідуальних мобільних застосунках спеціального призначення для візуальної орієнтації рухомих платформ на місцевості в умовах не бажаного використання традиційних систем підсвічування у видимому для людського ока оптичному діапазоні [13-24]. Додаткове підсвічування в ближньому інфрачервоному оптичному діапазоні поза межами видимості людського ока наразі стає все більш актуальним інструментом, що відкриває низку інноваційних можливостей і формує перспективний напрямок розробок систем розширеної функціональності

© Берест В.Ю., Борисов О.В., Лупина Б.І.

на основі комерційно доступних камер відеоспостереження і пристроїв підсвічування. Вимоги подовження терміну використання акумуляторної батареї між перезарядкою вимагає оптимізації режиму енергоспоживання подібних мобільних систем, в яких прожектор підсвічування є основним енергозатратним вузлом. Обмежена доступна потужність режиму живлення функції Power over Ethernet (PoE) у мережевих камерах і істотне підвищення температури корпусу з вбудованими підсвічуючими вузлами також обмежує можливості підвищення якості зображення шляхом виділення більшої потужності системі освітлення [25, 26].

Незважаючи на наявність на ринку України значної кількості комерційно доступних продуктів – камер відеоспостереження з вбудованим інфрачервоним підсвічуванням та окремих світлодіодних матричних прожекторів переважно на довжину хвилі випромінювання близько 850 нм та 940 нм, у вітчизняній науково-технічній літературі спостерігається критично низька кількість публікацій на цю тему. Наразі бракує результатів досліджень, що давали б обґрунтовані практично важливі інженерні рекомендації стосовно окремих важливих аспектів експлуатації подібних систем, оптимального режиму живлення освітлювача та його конфігурації з метою зниження енергоспоживання за рахунок оптимізації електричних режимів та спектральних характеристик пари «випромінювач – чутливий елемент фотоприймача». Ця робота є спробою започаткувати усунення дефіциту практично важливої технічної інформації в описаній галузі.

**Мета та основне завдання дослідження.** Метою даного дослідження є аналіз режимів інфрачервоного підсвічування об'єкта в умовах його критично низької чи повної відсутності природної освітленості для отримання зображення, придатного для наступного суб'єктивного сприйняття і оперативного використання оператором в задачах орієнтації на місцевості, а також об'єктивного аналізу програмними засобами. Важливою додатковою умовою режиму підсвічування може бути низька або повна відсутність чутливості людського ока до спектрального складу підсвічуючого випромінювання. Результати дослідження є актуальними в аспекті формування рекомендацій прихованого використання мобільного пристрою відеоспостереження з зовнішнім інфрачервоним підсвічуванням та енергоефективного використання його акумуляторної батареї.

**Аналіз літературних джерел за темою дослідження.** На поточний момент спостерігається широкий вибір моделей функціональних камер відеоспостереження від провідних світових виробників на вітчизняному ринку і одночасно значна кількість публікацій на тему розширення функціональності цих пристроїв в англomовному науково-технічному середовищі [1-4]. В Україні активно представлені висококваліфіковані учасники ринку надання послуг, як правило – авторизовані на виконання робіт із монтажу та сервісного обслуговування систем відеонагляду відповідно до технічної документації та рекомендацій виробників. В той же час, в українomовному технічному середовищі маємо констатувати критично низьку кількість публікацій про результати пошукових науково-дослідних робіт із розширення функціональності подібних систем, що базувалися б на елементній базі, комерційно доступній на вітчизняному ринку. Актуальними є потреби активізації робіт в цьому напрямку, включаючи підготовку кваліфікованих кадрів в навчальних закладах належних освітніх рівнів відповідно до викликів останнього часу з орієнтацією на сегмент технічних пристроїв спеціального призначення.

**Аналіз алгоритмів зчитування в матрицях зображення.** Фотоприймальна кремнієва матриця як ПЗЗ, так і КМОН, традиційно має значно ширший діапазон спектральної чутливості в порівнянні з людським оком - від ультрафіолетового до ближнього інфрачервоного випромінювання включно. В спектральному діапазоні її чутливості наявна вагома складова ближнього інфрачервоного світла; типова матриця камери може реагувати на фотони з довжиною хвилі до 1100 нм [12, 13, 29]. Формування інформаційного потоку починається з аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналів зображення від первинного перетворювача - матриці фотоелектричних сенсорів. Перетворення кольорового сигналу зображення з аналогової форми в цифрову передбачає дискретизацію в часі та квантування за рівнем; після аналого-цифрового перетворення отриманий сигнал зображення підлягає кодуванню (стисненню). Частота дискретизації сигналу повинна не менше ніж вдвічі перевищувати верхню частоту інформаційного спектру сигналу, інакше ймовірне виникнення значних спотворень зображення в процесі аналого-цифрового перетворення.

Матриці комплементарних металооксидних напівпровідникових (КМОН) світлочутливих сенсорів (англ. Complementary Metal Oxide Semiconductors, CMOS) та матриці світлочутливих пристроїв із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) (англ. Charge Coupled Devices, CCD) є двома провідними технологіями сенсорів зображення сучасних оптоелектронних систем. ПЗЗ сенсори традиційно

відрізняються кращою якістю зображення, вищою чутливістю та роздільною здатністю, також меншим рівнем шуму, а отже ширшим динамічним діапазоном вхідного сигналу. Крім того, більш зрілий виробничий процес робить ПЗЗ вигідними для додатків, які не можуть поставити під сумнів чи загрозу якість зображення. Навпаки, сенсорні матриці КМОН споживають менше енергії, технологія їх виробництва більш економна та надає гнучкість щодо алгоритмів вибіркового зчитування окремих пікселів. У звіті Wiley Industry News за 2022 рік ПЗЗ матриці наразі вважаються домінуючими на ринку з покриттям близько 75% обсягу. Проте КМОН швидко вдосконалюється і завойовує все більшу частку ринку. Останні розробки розширили можливості обох технологій. Сенсори ПЗЗ все ще мають покращений вихідний сигнал, вищу чутливість і якість зображення.

В технічних аспектах матриці світлочутливих сенсорів КМОН та ПЗЗ принципово відрізняються своєю архітектурою, алгоритмами фіксації і зчитування зображення. У ПЗЗ сенсорі заряд просторово переноситься через увесь чіп матриці і зчитується в одному куті масиву. Єдиний аналого-цифровий перетворювач ПЗЗ матриці послідовно трансформує кожен піксель зображення в цифровий код. Навпаки, кожен сенсор матриці КМОН (піксель) має кілька транзисторів, які одночасно надають доступ до пікселя, підсилюють заряд і транспортують його до індивідуального для кожного пікселя аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Підхід КМОН більш гнучкий, оскільки кожен піксель можна зчитувати і обробляти окремо чи в складі вибраного фрагменту зображення.

Відомі алгоритми фіксації зображення з матриці в загальному випадку передбачають наступні режими зчитування:

- режим рухомого затвора (англ. rolling shutter) – метод формування зображення, при якому кадр зчитується не як миттєвий знімок, а як послідовне в часі сканування площини матриці рядок за рядком горизонтально або стовпчик за стовпчиком вертикально. Метод «rolling shutter» виконується шляхом умовного «прокручування щілини електронного затвора» по площині світлочутливого матричного сенсора, на який протягом певного проміжку часу відбувається експонування зображення. Перевагою такого методу є те, що КМОН сенсор зображення може продовжувати реєструвати фотони світлового потоку протягом всього процесу експонування, таким чином збільшуючи світлочутливість. При цьому, оскільки не всі частини зображення фіксуються в один і той самий момент часу; динамічний фрагмент, відображений як єдине ціле в результуючому знімку, може бути спотвореним, розмитим за рахунок руху об'єкту зйомки відносно камери.

Таким чином, хоча кожен рядок в кадрі зчитується за однаковий проміжок часу, однак початок зчитування відбувається в різний час, що призводить до зсуву зчитування окремих рядків. Кінцева частота кадрів буде залежати від того, з якою швидкістю завершується повне зчитування одного кадру. Такий режим зчитування називається режимом рухомого затвору (англ. rolling shutter), схему якого показано нижче на рис. 1.

Для КМОН-матриці у режимі рухомого затвору частота кадрів визначається швидкістю аналого-цифрового перетворення одного рядка інформаційного сигналу (тактова частота АЦП), помноженою на кількість рядків матриці сенсора. Наприклад, для КМОН-камери, яка має тактову частоту 283 МГц із 1080 рядками пікселів, час зчитування одного рядка і, отже, затримка між зчитуванням двох сусідніх рядків 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 відповідає максимальній частоті кадрів 100 кадрів за секунду і мінімальній часовій роздільній здатності у повному кадрі 10 мс.

КМОН сенсор має набір (масив) аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), кожен з яких обслуговує окремий стовпець пікселів. Масив АЦП одночасно оцифровує один стовпець і робить цифровий вихід доступним для аналізу, перш ніж перейти до оцифровування наступного рядка. Затримка між зчитуванням різних рядків змушує реєструвати світло (збирати фотони) у децю інший час в кожному з рядків зображення (з інтервалом приблизно 14,82 мкс при частоті кадрів 60 кадрів/с в режимі високої роздільної здатності full HD), що зрештою створить артефакт рухомих затворів. Цей ефект буде більш вираженим для захоплення зображення більш швидких об'єктів. Режим глобального затвору (англ. global shutter), на противагу описаному вище режиму рухомого затвору, передбачає зчитування всього кадру як цілого в єдиний момент часу. ПЗЗ-сенсори в цьому аспекті є альтернативою КМОН-сенсорам, оскільки вони зазвичай використовують саме тип затвору global shutter, завдяки чому знімки відображають цілісну візуальну сцену в єдиний момент часу і не потерпають від цифрових артефактів руху.

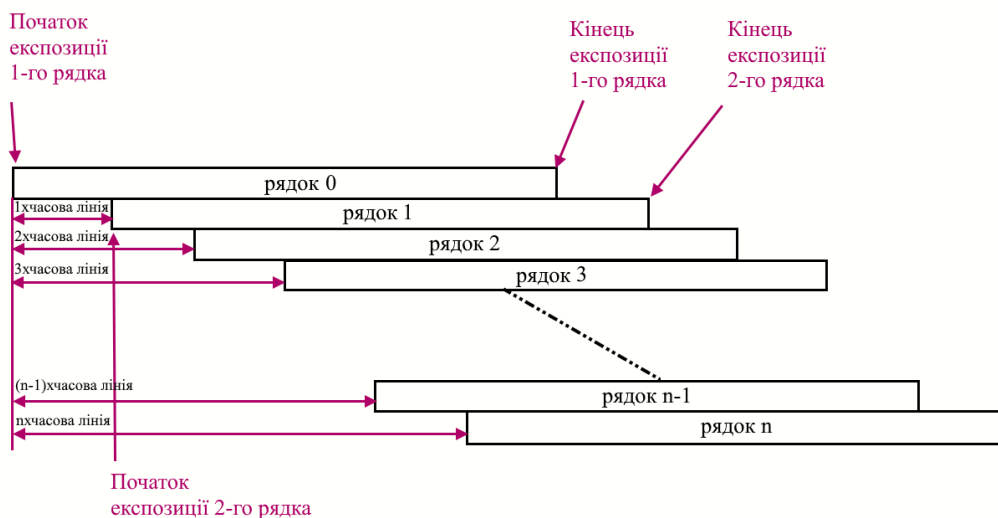


Рисунок 1 – Формування затримки у часі між кожним зчитуванням рядка пікселів матриці КМОН у режимі зчитування з рухомих затвором (англ. rolling shutter)

Поки що пристрої із зарядовим зв'язком все ще досягають вищої якості, створюють зображення з меншим рівнем шуму та пропонують вищу чутливість. Їхній виробничий процес більш зрілий і досконалий; вони мають вищу роздільну здатність. Тим не менш, КМОН сенсори також мають свої переваги: КМОН матриці традиційно споживають менше електроенергії, вони менш дорогі у виробництві, а ефект розмивання поступово усувається. КМОН сенсорю зображення властива висока чутливість в ближньому інфрачервоному (ІЧ) діапазоні. Активний тип кожного КМОН фоточутливого елемента зчитування зображення (active pixel sensor, APS) включає вбудований генератор синхронізації, генератор зміщення, підсилювач і аналого-цифровий перетворювач (АЦП).

Для захоплення зображення кожен піксель ПЗЗ матриці включає два основні компоненти: світлочутливу область, відому як фотоактивну область, і область передачі, відому як регістр зсуву. Зображення захоплюється у фотоактивній області масивом конденсаторів. Кожен конденсатор у масиві накопичує електричний заряд залежно від інтенсивності світла, отриманого від відповідної області зображення. Камери з лінійним скануванням, які знімають один «шматочок» зображення рядка матриці, використовують одновимірний масив, тоді як відеокамери та фотокамери, які знімають повні зображення, використовують двовимірний 2D масив. Після того як конденсатори ПЗЗ матриці зберуть заряди, що відповідають сигналу зображення на пікселі, керуюча схема ініціює процес передачі заряду від кожного конденсатора до сусіднього, реалізуючи тим самим регістр зсуву в дії. Останній конденсатор в масиві передає заряд до підсилювача для перетворення в сигнал аналогової напруги і далі на вхід АЦП. Цей процес повторюється, дозволяючи схемі керування перетворювати весь вміст напівпровідникового масиву сенсора в послідовність напруг. Цифрові пристрої працюють шляхом вибірки цих напруг, перетворених у цифрову форму, та зберігають у своїй пам'яті. З іншого боку, аналогові пристрої обробляють напруги в формі аналогового сигналу (наприклад, пропускаючи через фільтр низьких частот) і далі обробляють або передають їх.

Більшість камер на користувачьому ринку використовують саме метод «rolling shutter». Для матриці зі звичайним масивом фільтрів червоного, двох зелених та синього кольорів кожного пікселя (Red, Green + Green, Blue; RGGB) світло ближнього інфрачервоного діапазону (Near InfraRed; NIR) при слабкому освітленні у видимому діапазоні часто погіршує якість повнокольорового зображення, тому в режимі денної зйомки зазвичай використовується загальний для матриці блокуючий фільтр на довгохвильову частину спектру. І навпаки, навіть якщо вікно матриці не блокує інформацію діапазону NIR, неможливо отримати інформацію в інфрачервоній частині спектру з традиційної матриці RGGB. Для того, щоб отримати інформацію як у видимому, так і в ближньому інфрачервоному діапазонах з однієї матриці, потрібна додаткова функціональність її сенсора з чотирма спектральними складовими: три складові RGB та одна NIR. Однак, оскільки існують перехресні перешкоди між кожним каналом, тому знадобляться додаткові алгоритми поділу спектральних діапазонів, щоб одночасно отримати інформацію про NIR, червоний, зелений і синій з одного зображення [2, 3].

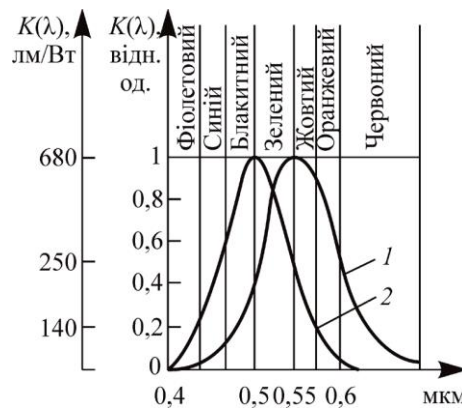


Рисунок 2 – Спектральна характеристика чутливості людського ока для денного (1) та нічного (2) зору [29]

З розвитком традиційної технології отримання кольорового зображення методом лінійного сканування матриці з кольорами RGGB з'являються альтернативні пропозиції з наступними чотирма спектральними діапазонами: червоним, зеленим, синім і ближнім інфрачервоним (RGB-NIR). В наукових літературних джерелах повідомляється про дослідження і розробки в цьому напрямку; дані RGB-NIR вводяться безпосередньо в алгоритми обробки і покращення зображення для обчислення 4D-даних; у цих випадках включається надлишкова інформація, а висока кореляція між діапазонами призводить до неможливості повністю використовувати характеристики даних RGB-NIR. Для досягнення результату дослідниками пропонується двоканальний алгоритм згорткової нейронної мережі (Convolution Neural Network, CNN), який враховує сильну кореляцію між смугами R, G і B і слабшу кореляцію між NIR і трьома смугами R, G, і B. Спочатку характеристики діапазонів RGB і NIR обчислюються в двох різних мережах CNN, а потім об'єднання функцій виконується на наступному рівні. Завдяки поєднанню двох нейронних мереж RGB-CNN і NIR-CNN повною мірою використовуються відповідні характеристики даних RGB-NIR.

Двома основними перешкодами для повнофункціонального використання комерційно доступних споживчих відеокамер у програмах стробоскопічного підсвічування є наступні фактори:

- відсутність апаратних засобів для синхронізації процесів фіксації кадру, що може призводити до помилкового градієнту освітленості зображення по площі при використанні зовнішніх стробованих підсвічувачів;

- використання режиму «рухомого» затвора при фіксації зображення (режим «scrolling shutter»), що передбачає часовий зсув між фіксацією окремих елементів кадру (окремі лінії сканування – рядки - в кадрі реєструються з деяким часовим зсувом в межах інтервалу експозиції) і може призводити до динамічних спотворень зображення у результируючому відеосигналі.

Використання ПЗЗ все ще поширене на сьогоднішній день через його високу якість зображення та низький рівень шуму зчитування. Обидві технології наразі продовжують розвиватися. Поки що сенсори ПЗЗ все ще мають вищу якість зображення та менший рівень шуму, тоді як КМОН стабільно покращують характеристики з точки зору енергоспоживання та усунення ефектів небажаного розмазування зображень рухомих об'єктів. Завдяки можливості вибору режиму глобального затвора для КМОН матриць, вони продовжують наздоганяти матриці ПЗЗ за комплексом характеристик. Однак, за умови усунення артефактів спотворення динамічного кадру, пов'язаних із ефектом рухомого затвора (rolling shutter) та з використанням КМОН сенсорів з режимом глобального затвора (global shutter), прогнозується зростання їх впровадження в комерційний сектор ринку. Технологія ПЗЗ має застосування в дослідженнях та випадках критичного контролю, де висока якість зображення та довший час експозиції є основною вимогою і обґрунтованою нормою. Ключова перевага ПЗЗ тут — менший темновий струм. Паралельно зростає попит на технологію КМОН у таких сферах масового застосування, як автоматизований контроль, 3D-сканування, управління трафіком. Ключовою перевагою КМОН є менше енергоспоживання та загальна вартість.

**Методи оцінки якості зображення.** Серед методів оцінки якості зображень виділяють групи, що передбачають суб'єктивні та об'єктивні підходи:

- методи, які враховують особливості сприйняття зображення людиною;
- методи, що враховують кількісно вимірні особливості зображення (контрастність, різкість, відношення сигнал-шум).

Методи першої групи більше орієнтовані на суб'єктивні результати оцінки якості зображення; ймовірно, вони більш наближені до умов використання зображення оператором, і в цьому їх цінність. Однак вони складні в реалізації, потребують значних організаційних зусиль та обчислювальних потужностей. Методи другої групи простіші в організаційній складовій реалізації, однак результати оцінювання якості за цими методами не завжди корелюють з суб'єктивними. Для виділення із множини об'єктивних методів вимірювання якості зображень потрібного набору, який можна надалі застосувати у власних експериментальних дослідженнях, варто застосувати низку класифікаційних критеріїв: обчислювальна складність, відповідність суб'єктивним оцінкам, необхідність використання еталонного зображення, доступна апаратна і програмна реалізації, тощо.

**Експериментальна частина дослідження.** З метою проведення експериментальних досліджень в роботі обрано сучасну роботизовану (поворотну варіофокальну) камеру моделі Reolink E1 Outdoor [30] (вбудовані 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). Вона оснащена якісним сенсором зображення - КМОН матрицею (CMOS Sensors) з роздільною здатністю 3840 x 2160 елементів зображення – 8 мегапікселів 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 варіофокальним моторизованим об'єктивом з фокусною відстанню  $f = 2.8 \div 8$  mm (zoom module), вбудованим прожектором нічного інфрачервоного підсвічування на відстань до 12 м (загалом 12 світлодіодів на довжині хвилі 850 нм загальною потужністю 2,7 Вт), прожектором, що забезпечує режим кольорового нічного бачення (Spotlights 4 pcs/2.7W/6500K/180Lumens) з кольоровою температурою 6500 К та яскравістю 180 Лм. Камера Reolink E1 Outdoor PoE розроблена для внутрішнього і зовнішнього використання, включає передові функції детального аналізу зображення у науковому контексті, забезпечує поле зору по горизонталі в межах  $94^\circ - 50^\circ$  і по вертикалі в межах  $53^\circ - 30^\circ$ . Функціональність камери включає автоматичне перемикання з режиму фіксації кольорового зображення в режим нічної зйомки, що передбачає використання ІЧ фільтру для денного режиму (IR-cut filter with auto-switching). Інформаційний інтерфейс камери – Ethernet розетка RJ45, 10M/100Mbps; 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 руху людей чи транспортних засобів із зменшеною ймовірністю хибного спрацювання.



Рисунок 3 – Камера Reolink E1 Outdoor PoE: 1 – сенсор денного світла; 2 – світлодіоди прожектора кольорового нічного бачення; 3 – об'єктив; 4 - світлодіоди прожектора інфрачервоного нічного підсвічування; 5 – індикатор статусу камери [30]

Додатково камера також вона має двохсторонній аудіозв'язок та сирену. Для зберігання даних передбачено слот для використання карти microSD ємністю до 256 ГБ. Вона використовує режим 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.

**Синтез зовнішнього підсвічуючого вузла та методика його досліджень.** Наявні інтерфейси камери Reolink E1 і технічна документація не надає користувачеві апаратні чи програмні можливості синхронізації режиму фіксації кадру із зовнішнім підсвічуванням [30]. Електричний режим живлення матриці ІЧ світлодіодів вбудованого нічного підсвічування – постійний і не передбачає можливостей для користувача використання стробованого живлення і управління режимами. Це стимулювало авторів до розробки додаткового зовнішнього підсвічуючого вузла, який в рамках цієї роботи не мав можливості синхронізації з режимом рухомого затвора камери. Для забезпечення зовнішнього підсвічування ближнім інфрачервоним випромінюванням в режимі регульованого стробування в роботі використано платформу для розробки віртуальних приладів NI ELVIS II [31, 32], розроблено драйвер світлодіодних підсвічувачів, що апаратно та програмно керується за амплітудою, зсувом, частотою повторювання імпульсів підсвічування та їх скважністю. Режими зовнішнього підсвічування реалізовано і досліджено з використанням комерційно доступних світлодіодів ближнього інфрачервоного діапазону з максимумом випромінювання відповідно на довжинах хвиль 850 нм та 940 нм і спектральною шириною 40 нм на піввисоті інтенсивності: OSRAM, модель SFH 4556 та Everlight, модель IR928-6C-F. Спектральні та енергетичні характеристики випромінювачів погоджені з приймачем матриці камери з оглядом на можливість наступної конструктивної та експлуатаційної гнучкості в аспектах розробки багатоелементного підсвічувача з можливістю вибору електричних режимів його живлення. У якості випромінювачів використовуються високопотужні світлодіоди. Світлодіоди NIR в лабораторних дослідженнях розміщено на робочій відстані 1,5 м ÷ 2 м від мішені для її достатньо рівномірного освітлення. 2.8 ÷ 8 - міліметровий компактний варіофокальний об'єктив камери має належну пропускну здатність у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах і формує зображення мішені на матриці. Фото експериментальної установки в лабораторних умовах наведено на рис. 4.



Рисунок 4 – Постановка лабораторного експерименту: 1 – мішені зображення відповідно до стандарту USAF 1951 (Standard Layout Chart); 2 – платформа NI ELVIS II для розробки віртуальних приладів з драйвером освітлювачів, зібраним на макетній платі платформи; 3 – камера Reolink E1 Outdoor PoE на регульованому штативі з додатковими зовнішніми підсвічувачами, змонтованими з фронтального боку камери; 4 – мережевий пристрій Cudy AC1200 WR1200 для бездротового зв'язку з камерою; 5 – персональний комп'ютер з програмним забезпеченням LabVIEW.

**Основні результати дослідження та їх обробка.** Наведемо окремі результати обробки зображень, отриманих в експериментальній частині роботи для змінної скважності підсвічуючого стробованого сигналу. Гістограми отримано в результаті використання розробленого в роботі власного програмного середовища для об'єктивного аналізу.

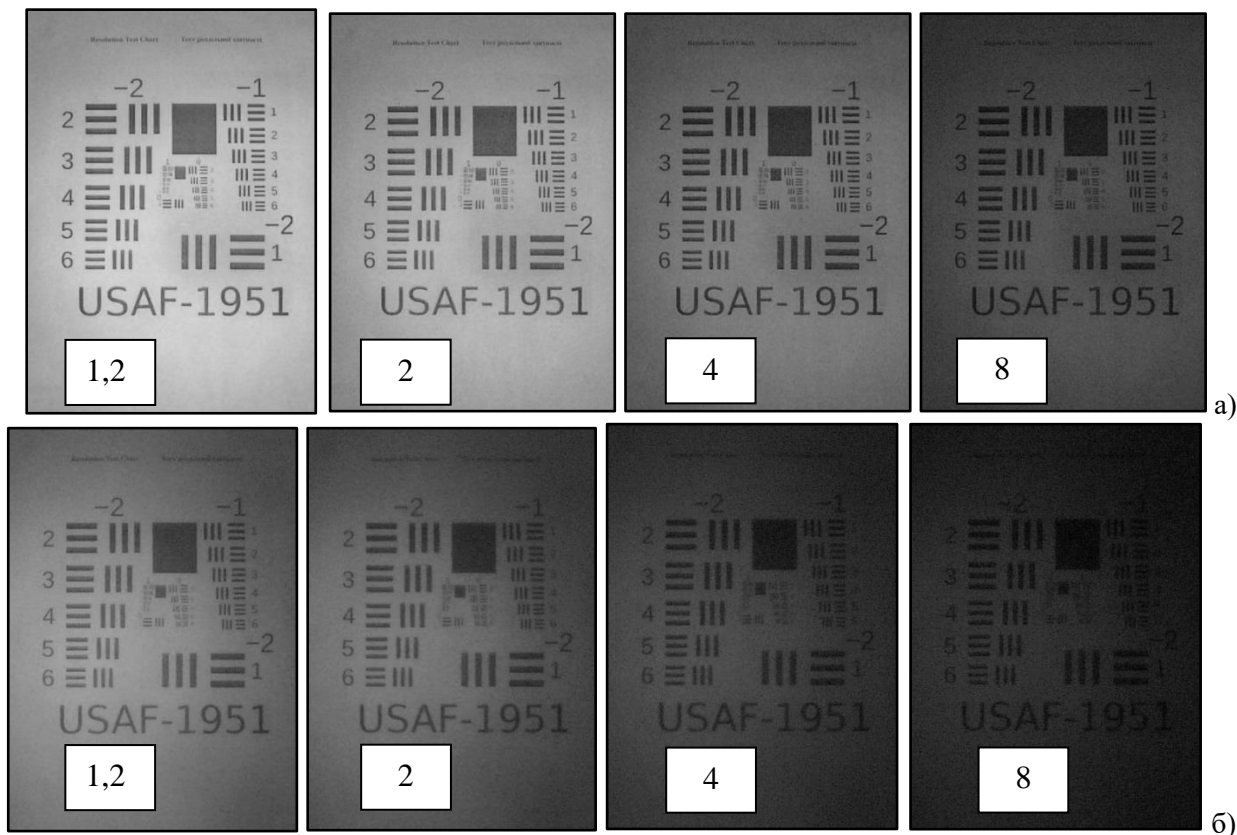


Рисунок 5 – Зображення тестової мішені за скважності імпульсу від 1,2 до 8 з використанням зовнішнього підсвічування на довжині хвилі: а) – 850 нм, б) – 940 нм.

Програмний аналіз зображення реалізується за допомогою алгоритму, що передбачає обчислення параметрів 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 в залежності від змінного параметра; гістограми візуалізуються з відповідними мітками та кольорами). Горизонтальні та вертикальні елементи тестової мішені використовуються для одночасної оцінки горизонтальної та вертикальної роздільної здатності на скінченних просторових частотах. Кожен елемент мішені має унікальні ширину та інтервали і позначений числом від 1 до 6. Ці елементи організовані у групи з власними ідентифікаційними номерами; номери варіюються від -2 до 7 і використовуються для визначення просторової частоти. Роздільна здатність визначається за допомогою пар ліній, 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.



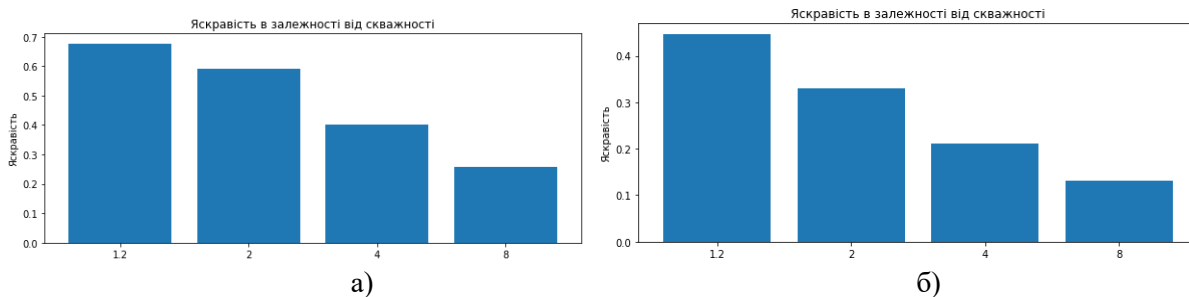


Рисунок 6 – Залежність яскравості від скважності при частоті модуляції  $f = 1$  кГц на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм.

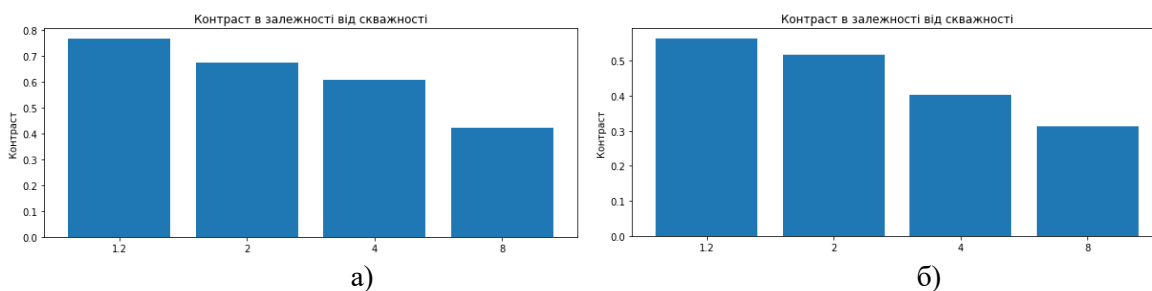


Рисунок 7 – Залежність контрасту від скважності при частоті модуляції  $f = 1$  кГц на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм.

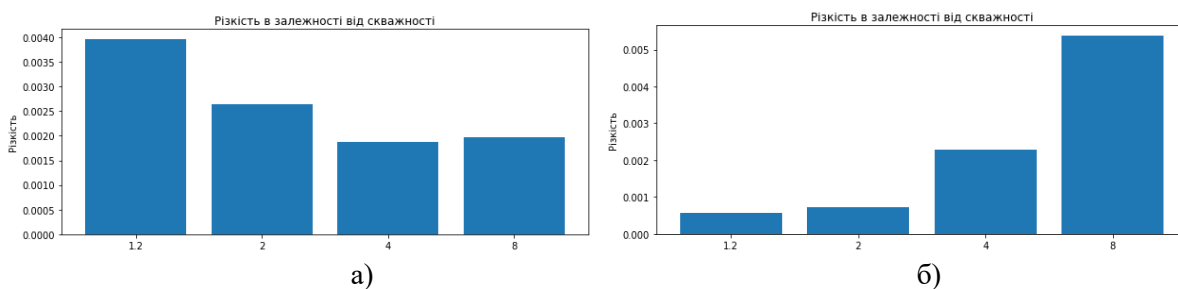


Рисунок 8 – Залежність різкості від скважності при частоті модуляції  $f = 1$  кГц на довжині хвилі випромінювання: а) 850 нм, б) 940 нм.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Отримані в роботі результати показали, що режим додаткового стробованого підсвічування в ближньому інфрачервоному діапазоні має значні резерви в сенсі оптимізації енергоспоживання автономного джерела живлення системи відеоспостереження без суттєвої втрати якості отриманого зображення і функціональності камери. Встановлені кореляції параметрів зображення мають суттєве значення для вибору оптимальних режимів підсвічування з точки зору оптимізації енергоспоживання для комплектів з автономними джерелами живлення в залежності від конкретних застосувань, зокрема для мобільного комплексу відеоспостереження. Подальші дослідження варто проводити в режимі синхронізації підсвічування з фіксацією кадру в режимі рухомого затвора.

#### інформаційні джерела

1. Huang, R.; Yamazato, T. A Review on Image Sensor Communication and Its Applications to Vehicles. *Photonics* 2023, 10, 617. <https://doi.org/10.3390/photonics10060617>
2. Yuxiao Cheng, Runzhao Yang, Zhihong Zhang, Jinli Suo, and Qionghai Dai "A Dual Sensor Computational Camera for High Quality Dark Videography". April 2022 [https://www.researchgate.net/publication/359890863\\_A\\_Dual\\_Sensor\\_Computational\\_Camera\\_for\\_High\\_Quality\\_Dark\\_Videography](https://www.researchgate.net/publication/359890863_A_Dual_Sensor_Computational_Camera_for_High_Quality_Dark_Videography). Published version: A mutually boosting dual sensor computational camera for high quality dark videography May 2023, DOI: 10.1016/j.inffus. 2023.01.013
3. J. Jiang, X. Feng, F. Liu, Y. Xu and H. Huang, "Multi-Spectral RGB-NIR Image Classification Using Double-Channel CNN," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 20607-20613, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2896128.

4. Seunghoon Jee and Moon Gi Kang «Sensitivity Improvement of Extremely Low Light Scenes with RGB-NIR Multispectral Filter Array Sensor» *Sensors* 2019, 19, 1256; doi:10.3390/s19051256
5. Zhuo, S., Zhang, X., Miao, X., Sim, T. (2010). Enhancing low light images using near infrared flash images. *Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP* : 2537-2540. ScholarBank@NUS Repository. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2010.5652900>
6. Z. Chen, X. Wang, and R. Liang, "RGB-NIR multispectral camera," *Opt. Express*, vol. 22, no. 5, p. 4985-4994, 2014.
7. Yadid-Pecht, Orly and Ralph Etienne-Cummings "CMOS Imagers: From Phototransduction To Image Processing" (2013), 251 p. eBook ISBN: 1-4020-7962-1.
8. Sukhavasi, S.B.; Elleithy, K.; Abuzneid, S.; Elleithy, A. CMOS Image Sensors in Surveillance System Applications. *Sensors* 2021, 21, 488. <https://doi.org/10.3390/s21020488>
9. Bigas, M.; Cabruja, E.; Forest, J.; Salvi, J. Review of CMOS image sensors. *Microelectron. J.* 2006. 37. 433–451.
10. Sukhavasi, S.B.; Elleithy, K.; Abuzneid, S.; Elleithy, A. CMOS Image Sensors in Surveillance System Applications. *Sensors* 2021. 21. 488. <https://doi.org/10.3390/s21020488>
11. Ohta, J. *Smart CMOS Image Sensors and Applications*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2020. <https://doi.org/10.1201/9781315156255>
12. HAMAMATSU Image sensors for scientific measurements and industrial equipment. CCD/CMOS image sensors. Document KMPD0002E 29 Jul. 2023 DN
13. 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](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/si_pd_kspd9001e.pdf) (дата звернення: 05.12.2023)
14. Чорній Р.І. ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДЕКОДУВАННЯ СИГНАЛУ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ. Деклараційний Патент України на винахід № 38407. Дата публікації 15.05.2001, Бюл. № 4, 2001 р.
15. Домашенко С.О., Лиховид А.Ю., Дмитриченко А.І. ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПІДСВІЧУВАННЯ. Патент України на корисну модель № 26082, Дата публікації 10.09.2007, Бюл. № 14, 2007 р.
16. Рудік В.М., Слижук В.М., Зачек О.І. ПРИСТРІЙ ІНФРАЧЕРВОНОГО ПІДСВІЧЕННЯ ДЛЯ ПРИЛАДІВ БАЧЕННЯ В ТЕМРЯВІ ПАП-1. Патент України на корисну модель № 19227, Дата публікації 15.12.2006, Бюл. № 12, 2006 р.
17. Рудік В.М., Фірман В.М., Слижук В.М., Зачек О.І., Рудий Т.В. ПРИСТРІЙ ІНФРАЧЕРВОНОГО ПІДСВІЧУВАННЯ ДЛЯ ПРИЛАДІВ БАЧЕННЯ В ТЕМРЯВІ ПАП-2. Патент України на корисну модель № 31121, Дата публікації 25.03.2008, Бюл. № 6, 2008 рік.
18. Білинський Й.Й. Аналіз сучасних багатоелементних фотоприймальних пристроїв та оптико-електронних методів і засобів на їх основі [Текст] / Й. Й. Білинський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2005. № 5. С. 9-15.
19. Охрімчук О.Б. «ОПТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ», "ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ". Луцьк, 2023. Випуск № 22, с. 107–113. DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-22-16
20. Осадца Я.М., Ріпецький Р.Й. «МАТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СВІТЛА З ЦИФРОВИМ ПРЕДСТАВЛЕННЯМ СИГНАЛУ». СВІЛОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, №4, 2009, С. 4–8.
21. Чирук, В. М. Еволюція датчиків зображення: КМОН-ФД і ПЗЗ-матриці / Чирук В. М., Шмирьова Л. М. // Перспективні напрямки сучасної електроніки: матеріали XIII науково-практичної конференції (4 квітня 2019 р., м. Київ) / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 176-181. URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37888>
22. R.S. Belliveau, "Image projection lighting devices with visible and infrared imaging", United States Patent US 2008/0165533 A1, Jul. 10, 2008.
23. US Patent Pub. No.: US 2008/0165533 A1. IMAGE PROJECTION LIGHTING DEVICES WITH VISIBLE AND INFRARED IMAGING, Pub. Date: Jul. 10, 2008.
24. S. Lin, J. Chi, S. Chou, C. Tsai, "Quantum-Dot Infrared Photodetector", United States Patent US 2006/0138396 A1, Jun. 29, 2006.
25. E.H. Sargent, J.J. Young Lee, E. Mandelli, J. Park, "Multi - terminal optoelectronic devices for light detection", United States Patent US 10,685,999 B2, Jun. 16, 2020.

26. EXIR and IR illumination for the video monitoring system. 5 differences, Video Surveillance Industry, Faceter Blog, July 29, 2021. URL: <https://faceter.cam/en/blog/exir-and-ir-illumination-for-the-video-monitoring-system-5-differences/> (дата звернення: 23.10.2023).
27. A compact multispectral image capture unit for deployment on drones. Conference May 2016: 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). DOI: 10.1109/I2MTC.2016.7520445
28. Zhenyue Chen, Xia Wang, Rongguang Liang "RGB-NIR multispectral camera". March 2014, Optics Express 22(5): 4985-94. DOI: 10.1364/OE.22.004985
29. Борисов О.В. Твердотільна електроніка : підручник / О.В. Борисов, Ю.І. Якименко; за заг. ред. Ю. І. Якименка. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. 484 с.
30. The TechGeeks. E1-Outdoor-PoE Reolink 4K 8MP PTZ PoE. Режим доступу 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).
31. 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)
32. 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)
33. Cudy. AC1200 Wi-Fi Router. Режим доступу URL: <http://www.cudytech.com/productinfo/2069184.html> (дата звернення: 26.11.2023).
34. National Instruments. NI ELVIS II. Режим доступу URL: <https://www.ni.com/en-us/support/model.ni-elvis-ii.html> (дата звернення: 26.11.2023).
35. NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II Series (NI ELVIS II Series) User Manual / National Instruments Corporation // Austin, Texas. June 2011 374629C-01. Режим доступу URL: [https://electrical.engineering.unt.edu/sites/default/files/NI\\_ELVIS\\_II.pdf](https://electrical.engineering.unt.edu/sites/default/files/NI_ELVIS_II.pdf) (дата звернення: 02.12.2023).

**Berest Vitalii, Borysov Oleksandr, Lupyna Borys**

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

#### **ACTIVE INFRARED ILLUMINATION FOR IMPROVED OPTICAL IMAGING IN LOW LIGHT CONDITIONS**

*The effect of object illumination modes by a near-infrared radiation source on the optical characteristics of images obtained in low level or complete absence of illumination conditions of the observation area was investigated. A Reolink E1 Outdoor PoE robotic video camera, equipped with a silicon CMOS matrix with a resolution of 8 MP and built-in illuminating spotlights in the visible and near-infrared ranges, was used for image acquisition and analysis. Images were fixed under specific object illumination conditions by an additional external source, taking into account the spectral characteristics of the matrix sensitivity for a number of emitters optical and electrical characteristics: power parameters, illuminators at different wavelengths. LEDs with a maximum intensity at a wavelength of 850 nm (OSRAM, model SFH 4556) and 940 nm (Everlight, model IR928-6C-F) were used as additional external illuminators of the experimental part of the work. To implement a electric lighting modes number, the NI ELVIS II virtual tools development platform was used in experimental works; a proprietary LED driver was developed based on an operational amplifier and a transistor cascade with adjustable pulse illumination parameters: amplitude, frequency, duty cycle. An objective assessment of images quality for the test target Standard Layout Chart of the USAF 1951 in terms of brightness, contrast, sharpness, and noise was performed using the software package developed in the work. The obtained results showed that the mode of strobed additional illumination in the near-infrared range has significant reserves in the sense of optimizing the energy consumption of the autonomous power source of the video surveillance system without significant loss of the received image quality and the functionality of the camera. The established correlations of the image parameters are essential for the selection of optimal illumination modes from the point of view of optimizing energy consumption for sets with autonomous power sources depending on specific applications, in particular for a mobile video surveillance set.*

**Keywords:** active infrared illumination, semiconductor image sensors, video surveillance camera.