

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«___» _____ 20__р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології»
спеціальності 151
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Інфрачервоний об'єктив для тепловізора»

Виконав:

студент IV курсу, групи ПО-91
Слінченко Юрій Миколайович

Керівник:

д. т. н., професор,
Колобородов Валентин Георгійович

Рецензент:

к. т. н., доцент
Безугла Наталя Василівна

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____

Київ – 2023 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ПО91.00016.000 ПЗ	Пояснювальна записка	54	
3	A1	ПО91.00016.000 ЛЗ	Оптична схема	1	
4	A2	ПО91.00016.006	Функціональна схема	1	
5	A1	ПО91.00016.000	Складальне креслення	1	
6	A2	ПО91.00016.007 СК	Збірка об'єктива	1	
7	A2	ПО91.00016.008 СК	Вузол матриці	1	
8	A4	ПО91.00016.001	Лінза	1	
9	A4	ПО91.00016.002	Лінза	1	
10	A4	ПО91.00016.003	Лінза	1	
11	A4	ПО91.00016.004	Різьбове кільце	1	

				ДП ПО91 00.000.00		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Слінченко Ю.М.				1	1
Керівн.	Колобородов В.Г.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІОНС Гр. ПО-91	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.						

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «ІНФРАЧЕРВОНИЙ ОБ'ЄКТИВ ДЛЯ
ТЕПЛОВІЗОРА»**

Київ – 2023 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма – «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____Надія БУРАУ

«___» _____ 20__р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Слінченко Юрію Миколайовичу

1. Тема проєкту «Інфрачервоний об'єктив для тепловізора», керівник проєкту Колобородов Валентин Георгійович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «30» травня 2023 р. № 2057 с.

2. Термін подання студентом проєкту: 10.06.2023

3. Вихідні дані до проєкту : Відносний отвір – 1:1, спектральний діапазон – 8-14 мкм, фокусна відстань 35 мм, тип приймача випромінювання – мікроболометрична матриця.

4. Зміст пояснювальної записки: 1. Огляд та аналіз літератури.

2. Обґрунтування функціональної схеми та принципу роботи приладу. 3. Конструкторські розрахунки. 4. Розроблення конструкції.

ПО91.00016.000 ПЗ

					<i>ПО91.00016.000 ПЗ</i>		
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розраб.		Слінченко Ю.М.			<i>Інфрачервоний об'єктив</i>	Літ.	Лист
Перевірив		Колобородов В.Г.					1
						<i>ПБФ, КІОНС</i>	
Н. Контр. Затверд.		Колобородов В.Г.			<i>Пояснювальна записка</i>		

5. Перелік графічного матеріалу: 1. Складальне креслення (1л. А1). 2. Оптична схема(1л. А1). 3. Схема функціональна (1л. А2). 4. Вузол матриці (1л. А2). 5. Збірка об'єктиву (1л. А2) 6. Різьбове кільце (1л. А4) 7. Лінза (1л. А4) 8. Лінза (1л. А4) 9. Лінза (1л. А4)

6. Дата видачі завдання: 23.05.2023

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формування завдання проєкту	23.05.2023	
2	Проведення аналітичного огляду	26.05.2023	
3	Розрахунок компонентів	1.06.2023	
4	Оформлення пояснювальної записки	3.06.2023	
5	Розробка креслеників	6.06.2023	
6	Подання ДП до передзахисту	8.06.2023	
7	Підготовка до захисту	10.06.2023	

Студент

Юрій Слінченко

Керівник

Валентин Колобородов

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		2

Анотація

У дипломній роботі було зосереджено увагу на створенні інфрачервоної системи спостереження, яка здатна реєструвати електромагнітне випромінювання в ІЧ-діапазоні. У ході дослідження було проведено аналіз аналогічних пристроїв, що вже існують, та розглянуто принцип їх роботи. Крім того, детально розглянуто складові, які використовуються в даному тепловізорі.

У рамках дипломної роботи була розроблена оптична система інфрачервоного об'єктива, яка забезпечує високу якість зображення. Також була розроблена функціональна схема пристрою. З використанням вхідних даних, були проведені розрахунки щодо розмірів та енергетичних характеристик системи.

Крім того, була надана докладна інформація про будову та принцип роботи приладу.

Загальний обсяг роботи: 46 сторінок пояснювальної записки, 22 рисунків, 18 бібліографічних найменувань.

Ключові слова: мікроболометрична матриця, інфрачервоний, неохолоджувальна, випромінювання, спостереження, тепло.

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
						3
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Abstract

The diploma thesis focuses on the development of an infrared surveillance system capable of detecting electromagnetic radiation in the infrared (IR) range. The research includes an analysis of existing similar devices and an examination of their operating principles. Furthermore, the components used in the thermal imager are thoroughly examined.

Within the scope of the diploma thesis, an optical system for the infrared lens was developed to ensure high-quality imaging. Additionally, a functional device scheme was designed. Based on the provided input data, calculations were performed to determine the dimensions and energy characteristics of the system.

Moreover, detailed information regarding the structure and operating principle of the device was provided.

Overall, the thesis consists of 47 pages of explanatory notes, 22 figures, and 18 bibliographic references.

Keywords: microbolometer array, infrared, uncooled, radiation, surveillance, thermal.

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
						4
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ	12
1.1 Огляд тепловізійних систем	12
1.2 Принципи дії та основні характеристики тепловізійних систем	18
1.3 Основні характеристики тепловізійних систем.....	19
1.4 Інфрачервоний об'єктив.....	25
1.5 Застосування тепловізорів у різних галузях.....	28
1.5.1 Медицина	28
1.5.2 Термографія будівництва	30
1.5.3 Тепловізори для полювання.....	31
1.6 Висновки до розділу 1.....	32
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ТА ПРИНЦИПУ РОБОТИ ПРИЛАДУ	33
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРАХУНКИ.....	36
3.1 Габаритний Розрахунок	36
3.2 Розрахунок оптичної системи об'єктива	37
3.3 Енергетичний розрахунок	38
3.3.1 Розрахунок коефіцієнта пропускання оптичною системою	38
3.3.2 Розрахунок питомої виявлювальної здатності мікроболометричної матриці	38
3.3.3 Оцінка опроміненості в площині ПВ	40

<u>3.4 Абераційний розрахунок</u>	<u>41</u>
РОЗДІЛ 4. КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРОБКИ.....	45
Висновок.....	46
Використані джерела	47

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		6

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

ІЧ – Інфрачервоний;

МДВ – Максимальна дальність виявлення;

ОЕСС – Оптико-електронна система стабілізації;

FPA – Матриця в фокальній площині (Focal Plane Array);

ТС – Тепловізійна система;

NIR – Близький інфрачервоний діапазон (Near Infrared);

SNIR – Короткий інфрачервоний діапазон (Shortwave Near Infrared);

MNIR – Середній інфрачервоний діапазон (Medium Near Infrared);

LNIR – Довгий інфрачервоний діапазон (Long Near Infrared);

FIR – Далекий інфрачервоний діапазон (Far Infrared);

АД – апертурна діафрагма;

ППВ – Площина приймача випромінювання;

ПВ – Приймач випромінювання;

МПВ – Мікроболометричний приймач випромінювання;

NETD – Чутливість еквівалентна температурній різниці (Noise Equivalent Temperature difference);

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
						7
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Інфрачервона енергія, що входить до складу електромагнітного спектра, охоплює гамма-промені, рентгенівські промені, ультрафіолет, видиме світло, інфрачервоне випромінювання, терагерцові хвилі, мікрохвилі та радіохвилі. Ці види випромінювання відрізняються один від одного за довжиною хвилі. Кожен об'єкт випромінює певну кількість інфрачервоного випромінювання, що залежить від його температури. Зазвичай, чим вища температура об'єкта, тим більше випромінювання інфрачервоного спектру, порівняно з випромінюванням чорних тіл. Особлива камера може виявити це інфрачервоне випромінювання так само, як звичайна камера фіксує видиме світло. Ця камера працює навіть в повній темряві, оскільки зовнішнє освітлення не має значення.

У різних країнах активно розвиваються тепловізійні прилади з різними функціями. З середини минулого століття і особливо в останні десятиліття, цей тип приладів, які дозволяють спостерігати в області інфрачервоного випромінювання, залучає все більше уваги розробників, що розширює спектр виробників та користувачів інфрачервоних пристроїв загалом, зокрема тепловізорів. Інфрачервоні приймачі, які утворюють основу тепловізійних пристроїв, були широко розроблені та виготовлені масово.

Головною метою цього проекту є створення інфрачервоної системи спостереження, яка буде точною і надійною.

Для досягнення цієї мети були сформульовані наступні завдання:

- Провести аналіз тепловізійних систем, що базуються на використанні болометричних матриць.
- Здійснити аналітичний огляд аналогічних рішень, що вже існують.
- Розробити оптичну схему тепловізора.
- Вибрати відповідний інфрачервоний об'єктив та болометричний приймач випромінювання.
- Провести габаритні та енергетичні розрахунки для забезпечення необхідних матеріалів.

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		8

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Огляд тепловізійних систем

На сьогоднішній день тепловізори застосовуються в таких областях діяльності людини, як: наука, техніка, будівництво, теплоенергетика, медицина, оборонні системи і комплекси. Існують різні класи тепловізорів, створені для вирішення різних завдань. Тепловізори – прилади, які призначені для спостереження теплового випромінювання нагрітих об'єктів. Їх призначення – у перетворенні інфрачервоного випромінювання в електричні сигнали, подальшій обробці цих сигналів та створенні термограм. Теплові (інфрачервоні) зображення – це зображення створені власним тепловим випромінюванням об'єкта. Зміни температури поверхні випромінювання об'єкта в певній мірі відповідають деталям візуально спостережуваної картини, тому створювані тепловізором зображення в основному відповідають уявленням про форму і розміри розглянутих об'єктів [1, с. 9].

Існує таке визначення : «оптико-електронний прилад, призначений для безконтактного (дистанційного) спостереження, вимірювання та реєстрації просторового та просторово-часового розподілу радіаційної температури об'єктів, що знаходяться в полі зору приладу, шляхом формування часової послідовності термограм та визначення температури поверхні об'єкта за відомими коефіцієнтами випромінювання та параметрами зйомки (температура навколишнього середовища, пропускання атмосфери, дистанція спостереження і т.п.)» [2].

Основні технічні параметри тепловізорів:

- Діапазон вимірюваних температур [°C];
- Роздільна здатність по температурі (різниця температур, еквівалентна шуму);
- Поле зору;
- Спектральний діапазон;
- Відстань спостереження;

За принципом отримання зображення бувають: скануючі тепловізори та матричні тепловізори.

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		9

Тепловізор - це вимірюваний пристрій, який дозволяє в будь-який час доби бачити термічне (інфрачервоне) випромінювання поверхні предметів, вимірювати температуру в будь-якій точці поверхні з точністю 0,1 ° С і вище. Основним призначенням тепловізора є безконтактне вимірювання температури об'єктів неживої та живої природи, пошук неполадок обладнання, втрати тепла в будівлях, виявлення об'єктів. По суті це камера, яка реєструє лише ІЧ-випромінювання. Тепловізорні камери створюють чіткі теплові зображення на основі різниці температур. Найгарячіші місця зафарбовуються червоним, жовтим та оранжевими, холодніші в синій та чорному. За спектральним діапазоном тепловізори поділяються на короткохвильові та довгохвильові.

Робочий спектральний діапазон короткохвильових тепловізійних систем можна обмежити середньохвильовим ІЧ-діапазоном, який відповідає вікнам прозорості атмосфери, тобто в рамках від 3 мкм до 5 мкм. Лінзові об'єктиви короткохвильових тепловізорів виготовляють з кремнію. Це охолоджувані тепловізійні камери, в яких використовують азотне охолодження, термоелектричне охолодження, та охолодження за допомогою мікрохолодильників Стірлінга [1, с. 16-17]. До короткохвильових тепловізорів відносять FLIR GasFindIR і FLIR SC7000.

Для випромінювання від джерел тепла характерні три типи випромінювачів: повністю чорні радіатори, сірі радіатори та селективні радіатори. Абсолютно чорне тіло - ідеалізоване поняття. При певній температурі він випромінює і поглинає теоретично можливий максимум випромінювання. У більшості твердих тіл, особливо в діелектриках, напівпровідниках та оксидах металів, розподіл енергії випромінювання по спектру при температурах близько 300 К має той самий характер, що і в абсолютному чорному тілі. Такі тіла називають «сірими». Вони характеризуються тим, що відношення їх енергетичної яскравості до енергетичної яскравості абсолютно чорного кольору, який має однакову температуру, не залежить від довжини хвилі і позначається як коефіцієнт теплового випромінювання.

Робочий спектральний діапазон довгохвильових тепловізійних систем знаходиться в рамках від 8 мкм до 14 мкм. Матриці таких тепловізорів не вимагають охолодження. Лінзові об'єктиви довгохвильових тепловізорів виготовляють з германію [1, с. 17]. Більша частина комерційних тепловізорів – довгохвильові. До них можна віднести FLIR P640, FLIR T640.

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
						10
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні тепловізори мають компактний моноблочний корпус, в якому об'єднані всі необхідні компоненти, такі як оптика, матриця, електроніка, екран, органи управління, носій для запису термограм, акумулятор. Портативні моделі тепловізорів додатково оснащуються вбудованими фотоапаратами, лазерними вказівками, лампами підсвічування та аудіо-гарнітурами. Вони мають невелику вагу, яка коливається від 350 грамів до 2 кілограмів. Завдяки вбудованому акумулятору, портативні тепловізори можуть працювати автономно до 8 годин. [1, с. 17].

Залежно від їхніх можливостей вимірювання температури, тепловізори бувають спостережними та вимірювальними. Спостережні тепловізори перетворюють теплове випромінювання об'єктів на видиме зображення, яке відображає інтенсивність інфрачервоного випромінювання у вибраній колірній шкалі або палітрі. [1, с. 18].

1.1 Тепловізор Pulsar Quantum HD38S Рисунок [3]



Рисунок 1.1 – Тепловізор Pulsar Quantum HD38S

Цей тепловізійний пристрій є монокуляром, призначеним для впізнавання живих об'єктів у темряві. Використовуючи приймач на основі неохолоджених мікроболометрів, ця тепловізійна система забезпечує високу роздільну здатність, що дозволяє виявляти теплові об'єкти на відстані до 900 метрів. Вона також дозволяє розпізнавати зброю, приховану під одягом, а також залишки теплових слідів, які залишають живі об'єкти та механізми, на близькій відстані.

Характеристики системи:

- Роздільна здатність мікроболометра: 384×288 пікс.;
- Частота зміни кадрів: 30Гц;

- Спектральний діапазон: від 7.7 мкм до 13.2 мкм;
- збільшення: x2.1;
- об'єктив: F38/1.2;
- дистанція виявлення: 950 м;
- температурна чутливість: < 50 мК;
- діапазон робочих температур: від -20°C до 50°C;
- поле зору: 14,4° (гориз.) x 10,8°(верт.).

1.2 Тепловізор Skanda 60M [4]



Рисунок 1.2 – Тепловізор Skanda 60M

Тепловізійна система Skanda 60M використовується як оптичний приціл для нарізної зброї, щоб виявляти цілі на коротких та середніх відстанях, особливо в умовах нічного часу, обмеженої видимості та погіршених погодних умов. Вона довела свою ефективність у гірському полюванні та надійно працює навіть в суворих зимових умовах. Ця система може бути використана як при стрільбі одиночними пострілами, так і при автоматичній стрільбі. Рекомендується застосовувати її на відстанях до 700-900 метрів. При цьому тепловізійна система Skanda 60M працює в пасивному режимі. Характеристики системи [4]:

- спектральний діапазон: від 8 мкм до 14 мкм;
- збільшення: x3; - поле зору: 9,2°(гориз.) x 6,9°(верт.)
- роздільна здатність: 640×480 пікс.;
- розмір пікселя матриці: 25 мкм;
- температурна чутливість: < 50 мК - дистанція виявлення 2000 м (для об'єкта з розмірами 1.7×0.5 м);
- частота зміни кадрів: 50 Гц;
- діапазон робочих температур: від -32°C до 60°C.

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		12

1.3 Тепловізор Infray Xeye E2n [5]



Рисунок 1.3 – Тепловізор Infray Xeye E2n

Тепловізійна система Infray Xeye E2n використовується як монокулярний тепловізійний пристрій для розпізнавання живих об'єктів в умовах нічного часу або обмеженої видимості на відкритій місцевості на відстанях до 800-900 метрів. Основною особливістю тепловізора Infray Xeye E2n є використання матриці, що виготовлена за технологією VOX (оксид ванадію). Ця технологія дозволяє отримувати більш насичені та контрастні зображення. Крім того, пристрій обладнаний цифровим збільшенням зі значенням 2X

Характеристики системи [5]:

- роздільна здатність матриці: 240x180;
- ядро VOx: 17 мкм;
- спектральний діапазон: від 8 мкм до 14 мкм;
- частота зміни кадрів: 50 Гц;
- діаметр об'єктиву: 13 мм;
- збільшення: x1; - поле зору: 17° (гориз.) x 13° (верт.);
- дальність виявлення: 870 м (для об'єкта з розмірами 1.7×0.5 м);
- діапазон робочих температур: від -20°C до 50°C.

1.4 Тепловізор FLIR C2 [6]



Рисунок 1.4 Тепловізор FLIR C2

Тепловізійна система FLIR C2 являє собою повнофункціональну компактну тепловізійну камеру, призначену для застосування в будівельній галузі. Вона дозволяє виявляти невидимі оком витoki енергії, структурні дефекти, протікання водопроводу і т.п.; а також створювати радіометричні зображення з роздільною здатністю до 4800 пікселів та зберігати термограми в форматі JPEG. Також до особливостей цієї системи можна віднести широкий кут огляду, що забезпечує зручність при зйомці, і високу термічну чутливість для виявлення найменшої різниці температур. 17 Рисунок 1.4 – Тепловізор FLIR C2. Основні характеристики системи FLIR C2 [6]:

- діапазон температур об'єкта: від -10°C до 150°C ;
- діапазон робочих температур: від -10°C до 50°C ;
- роздільна здатність: 80×60 (4800 пікселів);
- теплова чутливість: $0,10^{\circ}\text{C}$; - кут огляду: $41 \times 31^{\circ}$;
- частота зміни кадрів: 9 Гц; - дальність виявлення: 50 м;
- спектральний діапазон: від 7.5 мкм до 14 мкм. Після розгляду класифікації

тепловізорів для подальшого їх вивчення доцільно перейти до розгляду їх принципу дії та основних характеристик.

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		14

1.2 Принципи дії та основні характеристики тепловізійних систем

Принцип роботи тепловізійної системи [1 с. 42-43] полягає в наступному:

Інфрачервоне випромінювання з зовнішнього середовища фокусується за допомогою оптичної системи на приймач випромінювання, який видає сигнал, зазвичай у вигляді зміни напруги або електричного опору. Отриманий сигнал реєструється, оброблюється та, за потреби, перетворюється в електронне зображення (термограму) за допомогою електронного блоку обробки.

Сучасні досягнення технологій дозволяють людям добре бачити в повній темряві за допомогою інфрачервоного спектра. З використанням цього пристрою не потрібне зовнішнє освітлення - будь то природне або штучне. Тепловізор формує чітке зображення різних фізичних об'єктів на дисплеї або в оптичній системі, в залежності від особливостей кожної моделі.

Основою тепловізора є матриця, яка сприймає інфрачервоне випромінювання, невидиме для людського ока. Ціна пристрою залежить від розміру матриці. Більша матриця призводить до вищої вартості пристрою, але також дозволяє отримати більш деталізоване зображення.

Якби людське око могло бачити інфрачервоне випромінювання, ми змогли б визначати температуру предметів без необхідності їх торкатися. Однак, наші очі сприймають лише обмежену частину електромагнітного спектра, яке відповідає видимому світлу. Інфрачервоне випромінювання перебуває за межами спектральних можливостей наших очей. Видиме світло охоплює діапазон від 0,38 до 0,76 мікрометра, з піковою довжиною хвилі приблизно 0.

При використанні апаратури теплобачення процес пошуку і розпізнавання характеризується єдиною можливістю сприйняття, яка залежить від багатьох факторів, які впливають на цей процес. Ці фактори визначаються 19 характеристикою об'єкта (кутовий розмір, градієнти зміни яскравості на краях великих деталей зображення, положення на екрані, швидкість руху, режим роботи, контраст відносного фону), характеристикою спостерігача (тренованість, стомлення, вік, інтелект, робоче навантаження, периферична гострота зору, отримання попереднього інструктажу), характеристикою системи і різнорідними чинниками [1, с. 35-36].

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
						15
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Основні характеристики тепловізійних систем

Основні характеристики тепловізійних систем визначаються їх призначенням, наприклад: промислові теплові зори використовуються для оцінки теплових втрат будівель, або для знаходження перегрітих 22 електричних чи механічних вузлів; або військові тепловізійні прилади нічного бачення призначені для виявлення живої сили та техніки супротивника. Але існуючі технічні параметри та технології ставлять обмеження на можливостях покращення характеристик систем.

До основних характеристик тепловізійних систем відносяться: дальність дії (дальність виявлення малорозмірних тепловипромінюючих об'єктів), роздільна здатність, спектральна характеристика об'єктиву та матриці, кут поля зору, поріг температурної чутливості.

1) Порогова температурна чутливість. Чутливість тепловізійної системи – це величина мінімального температурного перепаду, яку здатна зафіксувати система. На чутливість впливають параметри оптичної системи та матриці, а також шар атмосфери між об'єктом і приладом.

Порогова температурна чутливість або інакше різниця температур, яка еквівалентна шуму – прирощення температури, яке дорівнює середньоквадратичному значенню шуму в термограмі, при спостереженні однорідного фону з заданою температурою [2]. Порогова температурна чутливість впливає на контрастність кінцевого зображення (термограми).

Підвищена порогова температурна чутливість потрібна для виявлення ділянок з підвищеною вологістю; протікань; перегрітих ділянок електронних схем та електричних і механічних установок; прихованих дефектів і т.п.

2) Дальність дії тепловізійної системи. Одним з основних параметрів тепловізійної системи є її дальність дії. Під дальністю дії прийнято розуміти максимальну відстань на якій тепловізійна система здатна виявляти малорозмірні тепловипромінюючі об'єкти [1, с. 371].

Дальність виявлення – максимальна відстань між точковим об'єктом спостереження і тепловізором, при якій вихідний сигнал останнього перевищує в задане число разів середньоквадратичне значення шуму.

Цей параметр залежить від великої кількості факторів (характеристик тепло 23 випромінюючого об'єкта, стану атмосфери, характеристик фону, на якому знаходиться спостережуваний об'єкт) [1, с. 400]. Дальність дії тепловізійної системи залежить як від внутрішніх параметрів системи так і від зовнішніх факторів. До характеристик системи відносять [1, с. 399]: просторово-частотну передавальну функцію, число рядків сканування, що припадають на кутовий розмір об'єкта, кутовий розмір екрану, теплову постійну часу мішені. До зовнішніх факторів можна віднести [1, с. 399]: характеристику спостерігача (тренованість, стомлення, вік, інтелект, робоче навантаження, периферична гострота зору, отримання попереднього інструктажу), та різnorідні чинники (площа зони пошуку, освітленість в кабіні спостерігача, вібрації зображення або спостерігача, допустимий час пошуку).

Для подальшого аналізу тепловізійних систем слід ввести такі поняття: МДВ R_d – це максимальна дальність між ОЕСС і стандартним тест-об'єктом, за якої тест-об'єкт виявляється на екрані дисплея із заданою ймовірністю P_d у разі необмеженого часу спостереження; та МДР R_r – це максимальна дальність між ОЕСС і стандартним тест-об'єктом, за якої тест-об'єкт розпізнається на екрані дисплея із заданою ймовірністю P_r у разі необмеженого часу спостереження [7, с. 220].

Чинники які впливають на дальність тепловізійної системи: атмосфера, внутрішні джерела перешкод, зовнішні джерела перешкод, матеріал лінзи оптичної системи, характеристики теплового випромінюючого об'єкта, характеристики фону. До характеристик об'єкту відносять [1, с. 378]: кутовий розмір, градієнти зміни яскравості на краях великих деталей зображення, положення на екрані, швидкість руху, режим роботи, контраст відносного фону.

Якщо параметри системи можливо корегувати, то з чинниками навколишнього середовища доводиться рахуватися. Зовнішнім джерелом перешкод для тепловізійних систем є інфрачервоне випромінювання тобто 24 всі нагріті тіла, які потрапляють в радіус дії приладу. Внутрішнім джерелом перешкод для тепловізійних систем є внутрішній шум матриці фотоприймача. Серед зовнішніх чинників слід приділити особливу увагу особливостям поширення ІЧ-випромінювання.

На результатах виявлення об'єкта впливають характеристики фону та тепловипромінювального об'єкта. Якщо між об'єктом і фоном існує високий контраст, ймовірність виявлення об'єкта збільшується, що в свою чергу позитивно впливає на дальність дії тепловізійної системи.

3) Роздільна здатність тепловізійної системи. Роздільна здатність – величина, що характеризує кількість зчитувальних елементів зображення на одиницю довжини. Зазвичай розмірність цієї величини вказують в точках на дюйм. Роздільна здатність детектора вказує на кількість теплових точок (горизонталь x вертикаль) – пікселів, які здатний зареєструвати тепловізор [1, с. 53]. Пікселем називають найменший окремий елемент матричного приймача випромінювання, який вловлює інфрачервоне випромінювання.

Збільшення кількості пікселів у матриці призводить до покращення якості зображення та збільшення рівня його деталізації. Чим більше пікселів, тим більш докладно, детально і чітко представлені об'єкти на знімках. В сучасних пристроях використовуються різні роздільні здатності (виражені у кількості пікселів): 160x120 - для первинної діагностики; 320x240 - для докладної; 640x480 і вище - для детальної діагностики.

Роздільну здатність можна розглядати з фізичної (апаратної) і інтерполяційної точок зору. Фізична роздільна здатність визначає можливості сканера в дискретизації зображення по горизонталі та вертикалі. Оптичну роздільну здатність можна покращити шляхом збільшення кількості реєструючих елементів або використання кількох фотоприймачів, які автоматично або вручну об'єднують окремі частини зображення.

Для реєстрації інфрачервоного випромінювання використовується матричний приймач випромінювання (фокальна площа матриці, FPA). Він представляє собою пристрій отримання зображення, що складається з масиву пікселів, які є чутливими до інфрачервоного випромінювання і розташовані на фокальній площині об'єктива.

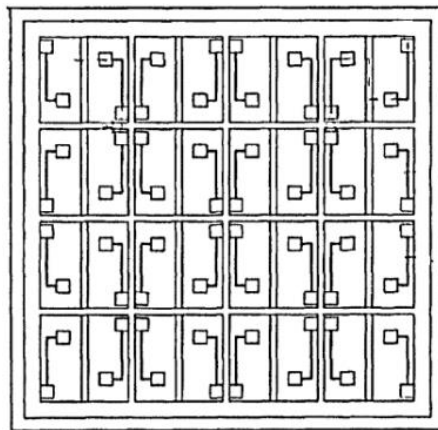


Рисунок 1.5 – Матриця в фокальній площині, FPA

4) Спектральна характеристика тепловізійних систем. Спектральна

характеристика ТС обумовлена двома факторами – Особливостями ІЧ-випромінювання з одного боку та характеристиками оптичної системи з іншого.

Збільшення кількості пікселів у матриці призводить до покращення якості зображення та збільшення рівня його деталізації. Чим більше пікселів, тим більш докладно, детально і чітко представлені об'єкти на знімках.

Роздільну здатність можна розглядати з фізичної (апаратної) і інтерполяційної точок зору. Фізична роздільна здатність визначає можливості сканера в дискретизації зображення по горизонталі та вертикалі. Оптичну роздільну здатність можна покращити шляхом збільшення кількості реєструючих елементів або використання кількох фотоприймачів, які автоматично або вручну об'єднують окремі частини зображення.

Для реєстрації інфрачервоного випромінювання використовується матричний приймач випромінювання (фокальна площа матриці, FPA). Він представляє собою пристрій отримання зображення, що складається з масиву пікселів, які є чутливими до інфрачервоного випромінювання і розташовані на фокальній площині об'єктива.

Інфрачервоне випромінювання ділять на умовні діапазони [1, с. 23]:

- ближня область (Near-infrared, NIR): $\lambda = 0,74 - 1,4$ мкм;
- короткохвильова область (Short-wave, SW): $\lambda = 1,4 - 3$ мкм;
- середньохвильова область (Mid-wave, MW): $\lambda = 3 - 5$ мкм;
- довгохвильова область (Long-wave, LW): $\lambda = 8 - 14$ мкм;
- дальня область (Far infrared, FIR): $\lambda = 14 - 1000$ мкм;

Діапазони MW (середньої хвильової довжини) і LW (довгої хвильової довжини) є основними робочими діапазонами для систем тепловізії, оскільки в цих діапазонах реєструється теплове випромінювання об'єктів, пов'язане з їх температурою.

Межі цих робочих тепловізійних діапазонів визначаються вікнами прозорості атмосфери. Інфрачервоне випромінювання, проходячи через земну атмосферу, ослаблюється через розсіювання і поглинання. Азот і кисень повітря слабо розсіюють інфрачервоне випромінювання порівняно з видимим світлом. Однак, інфрачервоне випромінювання сильно поглинається парою води і вуглекислим газом. Присутність зважених часток в атмосфері, таких як дим, пил, дрібні краплі води (серпанки, туман) і опади (сніг, дощ), також сприяє додатковому ослабленню інфрачервоного випромінювання [1, с. 23].

Робочий температурний діапазон. Сфера застосування тепловізійної системи визначається її робочим температурним діапазоном. Робочий температурний діапазон вказує на температурний діапазон, в якому система може виконувати вимірювання.

У будівельній галузі, наприклад, для тепловізійного обстеження будівель на виявлення теплових витоків, доцільно використовувати тепловізійні системи з верхньою межею робочого температурного діапазону до $+100^{\circ}\text{C}$. Для діагностики електроустановок та промислових установок реком

6) Кут поля зору. Кут поля зору – просторовий кут, в межах якого здійснюється формування термограми [2].

Кутом поля зору називають параметр об'єктива тепловізійної системи, який описує розміри простору при знімку об'єкта. Найчастіше вимірюється в градусах. Основні

параметри поля зору розраховуються за допомогою простої геометрії. Що

продемонстровано на рисунку 1.6, де D_1, D_2, D_3 – відстані від об'єктиву тепловізора до об'єкта вимірювання; X_1, X_2, X_3 – Ширина огляду по горизонталі;

Y_1, Y_2, Y_3 – Ширина огляду по вертикалі; S_1, S_2, S_3 – Мінімальний розмір об'єкта "видимий" з заданої відстані. З чого можна зробити висновок: Чим меншим є кут поля зору, тим далі можна відійти від об'єкта, не втративши при цьому в якості знімка. Фізично зображення об'єкту проєктується на детекторі, при цьому, чим далі тепловізор знаходиться від об'єкта, тим більш «розмитим» є зображення.

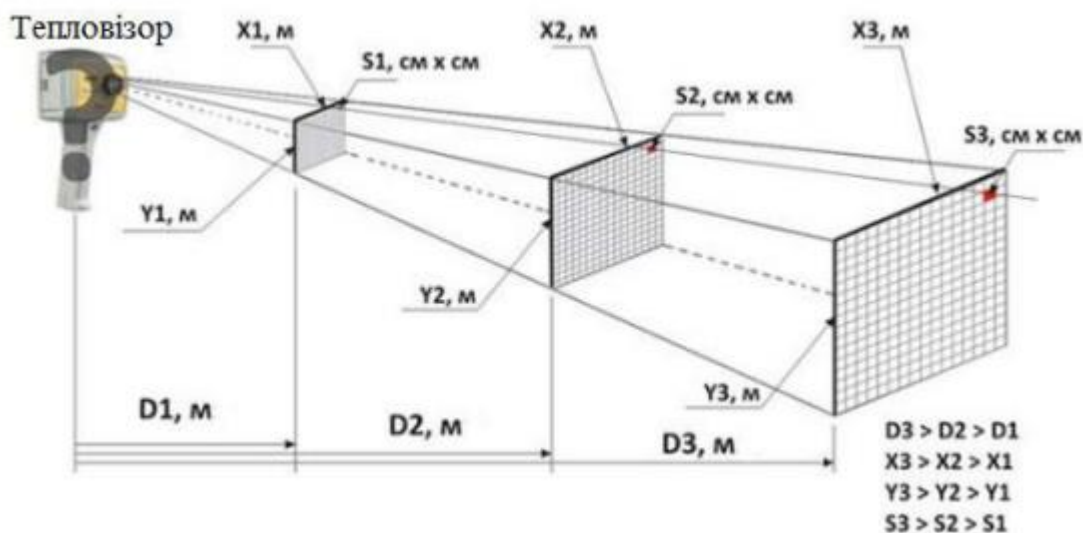


Рисунок 1.6 – Кут поля зору тепловізійної системи

7) Просторовий кут поля зору. Просторовий кут, в межах якого інфрачервоне випромінювання сприймається одним фоточутливим елементом фотоприймального пристрою [2]. Просторова роздільна здатність або миттєвий кут поля зору – це кут поля зору, який припадає на один піксель. Його легко порахувати, знаючи кут поля зору і кількість пікселів детектора, розділивши кут поля зору по одній з осей на відповідну кількість пікселів і перевівши значення в мілірадіани.

1.4 Інфрачервоний об'єктив

Інфрачервоний об'єктив - це об'єктив для камер або оптичних приладів, призначений для реєстрації та передачі інфрачервоного випромінювання. Інфрачервоне випромінювання (ІЧ) знаходиться у діапазоні електромагнітних хвиль між видимим світлом та мікрохвилями радіохвиль.

Інфрачервоні об'єктиви мають спеціальні оптичні поверхні та покриття, що дозволяють пропускати інфрачервоне випромінювання, а також сконцентрувати його на спеціальний детектор. Вони зазвичай виготовляються з матеріалів, які добре пропускають ІЧ-випромінювання, таких як силіцій, германій або халькогеніди.

Інфрачервоні об'єктиви використовуються в різних областях, зокрема в термовізії (для вимірювання температури об'єктів за їхнім ІЧ-випромінюванням), безпеці (для нічного бачення, виявлення руху тощо), медицині (наприклад, для виявлення пухлин чи патологічних змін в організмі) і багатьох інших галузях, де необхідне вимірювання або спостереження в ІЧ-діапазоні.

Інфрачервона оптика використовується для збору, фокусування або колімації світла в ближньому інфрачервоному (NIR), короткохвильовому інфрачервоному (SWIR), середньохвильовому інфрачервоному (MWIR) або довгохвильовому інфрачервоному (LWIR) спектрах. Інфрачервоний спектр складається з довжин хвиль від 700 до 16000 нм, і кожен відповідний спектр змінюється як:

- NIR 700 – 900 нм
- SWIR 900 – 2300 нм
- MWIR 3000 – 5000 нм
- LWIR 8000 – 14000 нм



Рисунок 1.7 - Об'єктив SWIR (короткохвильовий інфрачервоний)

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		22

Система SWIR охоплює діапазон спектру від 0.9 мкм до 3 мкм. Матеріал оптики повинен пропускати видиме та інфрачервоне світло, і йому потрібне джерело світла, наприклад сонце, місяць, зірки тощо.

Він використовується в численних додатках, таких як спектроскопія для сортування, виявлення вологи, тепловізор (використовується для скляних і пластикових об'єктів) і отримання зображень – лазери нічного бачення та зображення.

Середньохвильовий інфрачервоний (MWIR)



Об'єктив MWIR

Рис 1.8 – Об'єктив MWIR

Система MWIR охоплює діапазон спектру 3-5 мкм і зазвичай є системою з охолодженням. Таким чином, вона менш схильна до впливу вологості порівняно з системою LWIR для більшості цільових діапазонів, яка підходить для таких застосувань, як прибережне спостереження, спостереження за рухом суден або охорона гавані.

Оскільки головною метою є отримання високоякісних зображень, а не зосередження на вимірюванні температури та мобільності.

Зображення нижче показують, що MWIR-зображення чіткіше та має високий тепловий контраст порівняно з LWIR-зображенням.



Зображення MWIR



Зображення LWIR

Рис 1.9 а- зображення MWIR, б- зображення LWIR.

Довгохвильовий інфрачервоний (LWIR)



Рис. 1.10 – робота об'єктиву LWIR.

Система LWIR працює в діапазоні спектру 7-14 мкм. Однак більшість камер LWIR ефективно охоплює 8-12 мкм.

Система LWIR широко відома як «теплові зображення», оскільки вона виявляє теплові сигнатури, що випромінюються від об'єкта, і не вимагає освітлення для формування зображення. Тепловізійні можливості системи LWIR зробили її привабливим ключовим компонентом для все більшої кількості військових, охоронних, наглядових, наукових і промислових застосувань.

Категорії функціональності лінз

Як правило, інфрачервона оптика поділяється на SWIR, MWIR та LWIR за спектром довжини хвилі. Однак він також розділений на підкатегорії за тим, як він розроблений відповідно до його функціональності, наприклад:

Атермальна лінза

Оптична система атермізована, якщо її критичні параметри продуктивності, такі як передавальна функція модуляції, задня фокусна відстань та ефективна фокусна відстань тощо, не змінюються суттєво в діапазоні робочих температур.

Об'єktiv масштабування

Оптична система, яка безперервно охоплює вузький і широкий кут огляду.

Подвійний об'єktiv FOV

Оптична система, яка надає можливість чітко перемикатися з широкого на вузький FOV.

Дводіапазонний об'єktiv

Оптична система, яка охоплює діапазони як MWIR, так і LWIR.

1.5 Застосування тепловізорів у різних галузях

1.5.1 Медицина

Медичне теплобачення (термографія) - метод діагностики, заснований на реєстрації інфрачервоного випромінювання на поверхні шкіри людини. В даний час термографія може бути застосована для діагностики понад 100 захворювань, оскільки існує прямий зв'язок поверхневих ефектів з процесами, що відбуваються в організмі.

Температура тіла людини - найуніверсальніший показник його біологічної активності. Всім типам захворювань властива температурна реакція. Аномальна температура - це перший симптом для будь-якої хвороби. Завжди вимірювання температури і всього тіла, і окремих органів, були важливими показниками для розпізнавання характеру хвороби, її тяжкості перебігу. Ці фактори сприяли до розвитку методик тепловізійної діагностики.

Термографія вважається методом пасивної діагностики. Уже кілька років тепловізори з успіхом застосовуються в діагностичних і клінічних центрах.[9]

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
						25
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

У діагностичних центрах термографія застосовується для діагностування хребта, захворювань щитовидної залози в ендокринології, в стоматології - з метою виявлення запальних процесів, органів шлунково-кишкового тракту в гастроентерології, для контролю перебігу лікування захворювань, які пов'язані з порушеннями периферичного кровообігу і т.д ..

Термограми людського тіла (розподіл температури по його поверхні) містять дуже цінну інформацію. Візуалізовані температурні поля дають можливість мати уявлення про периферійному кровотоці і отримувати відомості про глибинні процеси, які протікають в організмі.

За допомогою термографії і застосування тепловізора для медичного обстеження можливо всередині організму виявити і розпізнати багато патологічні зміни на ранньому, доклінічному етапі. Термографія при комплексній діагностиці хвороби додатково забезпечує найважливішу інформацію про наявність та тяжкості запальних процесів і дає можливість дати оцінку ефективності консервативного лікування. У медицині тепловізор є незамінним при абсолютно безпечному і безконтактному обстеженні пацієнта.

Тепловізійна діагностика абсолютно безпечна і нешкідлива для пацієнтів і медперсоналу і є надзвичайно ефективним методом для ранньої діагностики захворювань ще до їх клінічного прояву, а також для контролю за процесом лікування і реабілітації.

Як свідчить практика застосування термографії найбільш ефективно її використовувати при:

- Скринінговому обстеженні працівників підприємств в процесі профоглядів
- Спостереженні за станом молочної залози жінок в процесі лікування і спостереженні за розвитком злоякісних змін.[9]
- Ряді захворювань опорно-рухового апарату (остеохондрози, артрити, артрози) і судин (змін в артеріях, варикозне розширення вен, хвороба Рейно)
- Виявленні запальних процесів в шлунково-кишковому тракті, жовчному міхурі, печінці
- Контролі ефективності лікувальних процедур, реабілітації та адаптації до фізичних навантажень в фізіотерапії, спортивній медицині, фітнесі.
- Обстеження проводиться всього організму в повний зріст, крім головного мозку.

1.5.2 Термографія будівництва

Термографія - це наукова розробка, яка дозволяє визначити тепловтрати. Завдяки використанню методу термографії будівлі фахівці отримують точні дані про якість та стан інженерних систем даного об'єкта. Термографія будівель сприяє проведенню точної оцінки якості, відсотка опору теплопередачі огорожуючих споруд, розрахувати точний коефіцієнт втрати тепла. До переваг термографії будівель можна зарахувати[10]:

- оперативне проведення перевірки;
- контроль без будь-якого втручання;
- можливість на різних площинах і площах порівняти параметри температури;
- допустимість проведення вимірювань в екстремальних умовах. Застосовується лише в разі небезпеки використання методів, або ж їх недоступності;
- теплове випромінювання можна візуалізувати;
- прогнозування аварійних зон (це дозволить застосувати до об'єкта профілактичні заходи ще до його поломки);
- виявлення тріщин, або будь-яких інших пошкоджень на поверхнях різних матеріалів.

Інфрачервона термографія вважається найефективнішим методом, завдяки якому дефекти можна визначити на ранній стадії розвитку. За допомогою інфрачервоної камери вимірюють температуру поверхонь будівлі. Всю картину того, що відбувається дуже добре можна побачити на дисплеї або ж на роздруківці. При аналізі отриманих результатів фахівці дають рекомендації щодо усунення недоліків, які були виявлені. Однією з переваг термографії будівель є швидке виявлення пошкоджень, наслідком яких є втрата тепла. За допомогою термографії будівель можна виявити будівельні помилки у внутрішньому приміщенні, наприклад, у надбудованих поверхах.

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
						27
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

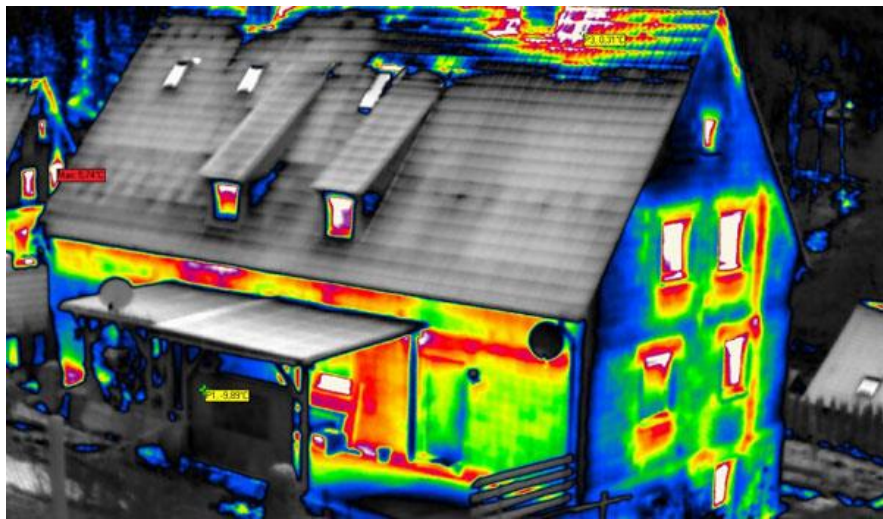


Рис. 1.11 – термограма будинку

Фахівці компанії «Гільдія Інжиніринг» при проведенні термографії будівлі дадуть відповідь на такі питання:

- чому і де саме йде тепло будівлі;
- звідки у спорудженні підвищена вологість;
- наскільки будівля добре теплоізована;
- хороший чи біля дверей і вікон технічний стан;
- де саме в системі "тепла підлога" порушена цілісність;
- гарна ізованість горищного приміщення;
- із-за чого в будівлі повітря дуже сухе;
- який краще вибрати вид утеплення для будівлі при цьому без особливих вкладень повчити максимальний ефект.

Термографію будівлі краще всього проводити в той час року, коли працює система опалення і краще всього, якщо буде мінімальна температура навколишнього середовища. Завдяки термографії будівлі можна визначити як розподіляється температура по поверхні будівлі в цей момент при впливі на нього різного роду зовнішніх факторів.[10]

1.5.3 Тепловізори для полювання

Уявити сучасного мисливця без просунутих допоміжних засобів, з кожним роком стає все важче. Старовинні дідівські методи і прилади давно пішли в минуле, залишивши місце обладнанню покоління Нью-Ейдж. В мисливські пристосування семимильними кроками увійшли нові технології, просунуті нічні прилади не встигли залишити стійких вражень, як відразу на цивільний ринок обрушилися тепловізійні. [11]

Переваги, якими володіють кращі тепловізори, не залишають ні єдиного шансу навіть самим обережним представникам тваринного світу. Звір може бути з легкістю виявлений з дистанції, недосяжною для його органів почуттів. Крім того, сучасні тепловізори дозволяють не тільки бачити і знаходити в будь-яких погодних умовах, але і безпосередньо транслювати в мережу все, що відбувається навколо. Вибір тепловізора перестав бути вузькою, спеціалізованою завданням. Широкі пропозиції на ринку і доступна вартість дозволяють застосовувати навіть початківцям мисливцям.

Важливим моментом перед покупкою, поки ще досить дорогого приладу, є передбачувана сфера застосування. Вибір тепловізора слід проводити в залежності від поставленої задачі, зовсім не обов'язково брати дорогий далекобійний прилад, якщо улюблений тип полювання – у загоні або з вишки. У теж час малопотужний і компактний інструмент буде абсолютно даремний в горах.

слід Звернути увагу на такі параметри[11]:

- Дистанція виявлення, як правило, позначається за ростової фігури (1,7х0.5м);
- Розмір чутливого сенсора – має прямий вплив на якість зображення;
- Діаметр об'єктива, потужна апаратура володіє великим діапазоном кратності;
- Чутливість. Виражений у милликельвинах (мК) параметр, що вказує на роздільну здатність тепловізора;
- Частота зміни кадрів модуля – 50 і більше Гц, вважається оптимальним;
- Захист від погодних факторів, габарити самого приладу;
- Наявність опцій відеозапису і спільної роботи з цифровими гаджетами.

1.6 Висновки до розділу 1

Після проведеного аналізу було встановлено, що сучасні тепловізійні камери застосовують неохолоджувальні мікроболометричні матриці з роздільною здатністю 640х480, 240х180, 384х288 і 80х60 пікселів. У цих пристроях використовуються 3-4 лінзи, виготовлені з матеріалів, таких як германій, селенід цинку, оксид ванадія та інші. Всі ці сучасні компоненти та їх різні комбінації дозволяють отримати системи з високим пропусканням світла та високою якістю зображення, що знайшли застосування у багатьох сферах.

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		29

РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ТА ПРИНЦИПУ РОБОТИ ПРИЛАДУ

Оскільки тепловізор є пристроєм, що використовується для моніторингу розподілу температури на досліджуваній поверхні, цей розподіл зручно відображати на дисплеї або зберігати в пам'яті тепловізора у вигляді кольорового поля з відповідними кольорами для певних температур. Зазвичай на дисплеї відображається діапазон температур поверхні, який видимий для об'єктива.

У більшості доступних моделей бюджетних тепловізійних камер дані зберігаються в пам'яті пристрою і можуть бути переглянуті через інтерфейс, що підключається до комп'ютера. Такі тепловізори зазвичай використовуються разом з ноутбуком або ПК та програмним забезпеченням, яке дозволяє отримувати дані в режимі реального часу.

Тепловізійні камери доступні для спостереження та вимірювання. У першому випадку вони просто створюють зображення, яке відображається видимим в інфрачервоному спектрі з використанням певної кольорової палітри. При вимірюванні за допомогою тепловізійних камер, кожному пікселю відповідає цифровий сигнал, що відповідає певній температурі, створюючи зображення розподілу температури. Оскільки нерівномірне нагрівання тіл призводить до створення специфічної карти розподілу інфрачервоного випромінювання, функціональність всіх тепловізійних систем заснована на виявленні температурної різниці між об'єктом та фоном та перетворенні цієї інформації на зображення, яке можна сприйняти людським оком. Сучасні тепловізійні пристрої можуть виявляти температурний контраст у межах 0,05-0,1 К.

У порівнянні з оптичними приладами нічного бачення, які працюють на основі електронно-оптичних перетворювачів (EOS) і сприймають випромінювання з довжиною хвилі приблизно 1-2 мкм, що мало відрізняється від чутливості людського ока, основні робочі діапазони тепловізійних пристроїв охоплюють довжини хвиль від 8 до 14 мкм для дальнього інфрачервоного випромінювання та від 3 до 5,5 мкм для середнього інфрачервоного випромінювання. У цих діапазонах інфрачервоне випромінювання може проникати через поверхневі шари атмосфери.

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		30

Тепловізійні пристрої забезпечують здатність до далекого спостереження у будь-який час доби завдяки використанню інфрачервоного маскування випромінювання, яке проникає навіть через атмосферні перешкоди з низькою прозорістю, такі як туман, дощ, сніг, пил і дим. Варто зазначити, що вологий пар та вуглекислий газ мають високу поглинаючу здатність в інфрачервоному спектрі, що суттєво впливає на чутливість тепловізійних пристроїв.

Сучасні тепловізійні пристрої використовують двовимірну багатоелементну матрицю фотодетекторів (FPA) на фокальній площині як світлочутливий елемент. Ця матриця виготовлена на основі напівпровідників, таких як кремній та германій.

Оскільки сучасні тепловізійні камери не потребують оптомеханічного сканування, вони є компактними, енергоефективними, мають високе відношення сигнал/шум та забезпечують високу якість зображення.

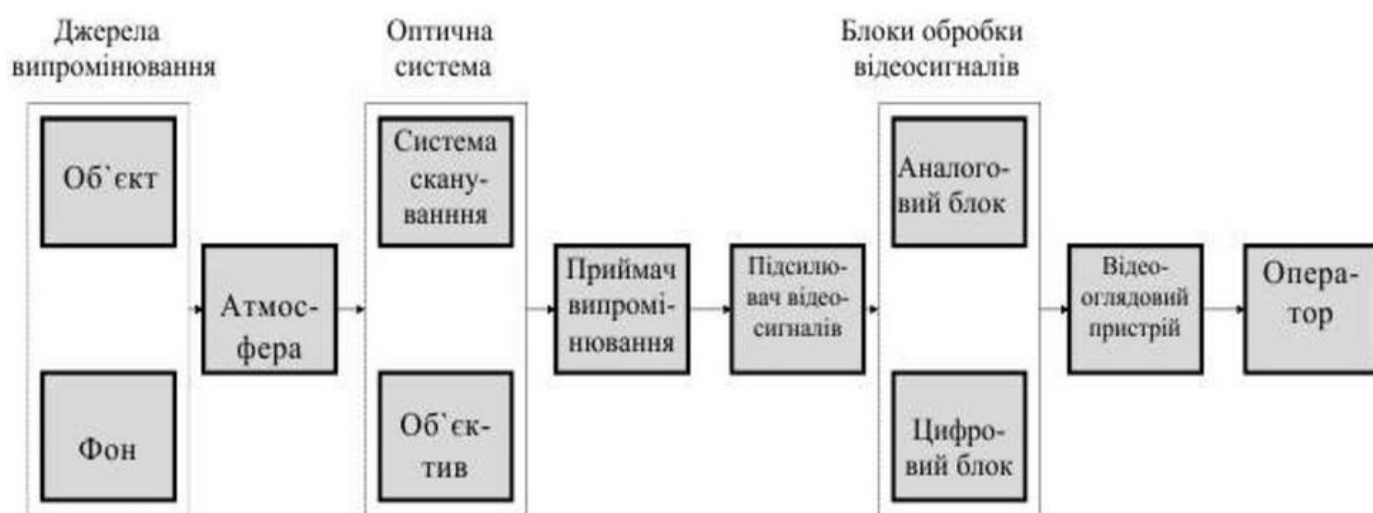


Рис. 2.1 – Функціональна схема узагальненої тепловізійної системи[12, с 6].

Оптична система складається з різного роду комбінацій лінз, дзеркал, призм, світофільтрів ті іншого. ОС виконує такі основні функції[12, с 7]:

1. Формує теплове зображення об'єктів та фонів у площині ПВ з необхідним масштабом та якістю.
2. Трансформує з мінімальними втратами можливо більший потік випромінювання від об'єктів та фонів до ПВ.
3. Забезпечує необхідний огляд для простору об'єктів при малому миттєвому полі зору.
4. Забезпечує спектральну фільтрацію оптичного сигналу з метою збільшення відношення величини випромінювання від об'єкта до величини випромінювання від фону.
5. Виконує слідування за об'єктом і визначає його координати.

Для досягнення головної мети проєкту було взято за основу патентну розробку інфрачервоного об'єктиву[13] і мікроболометричну матрицю компанії Lynred.

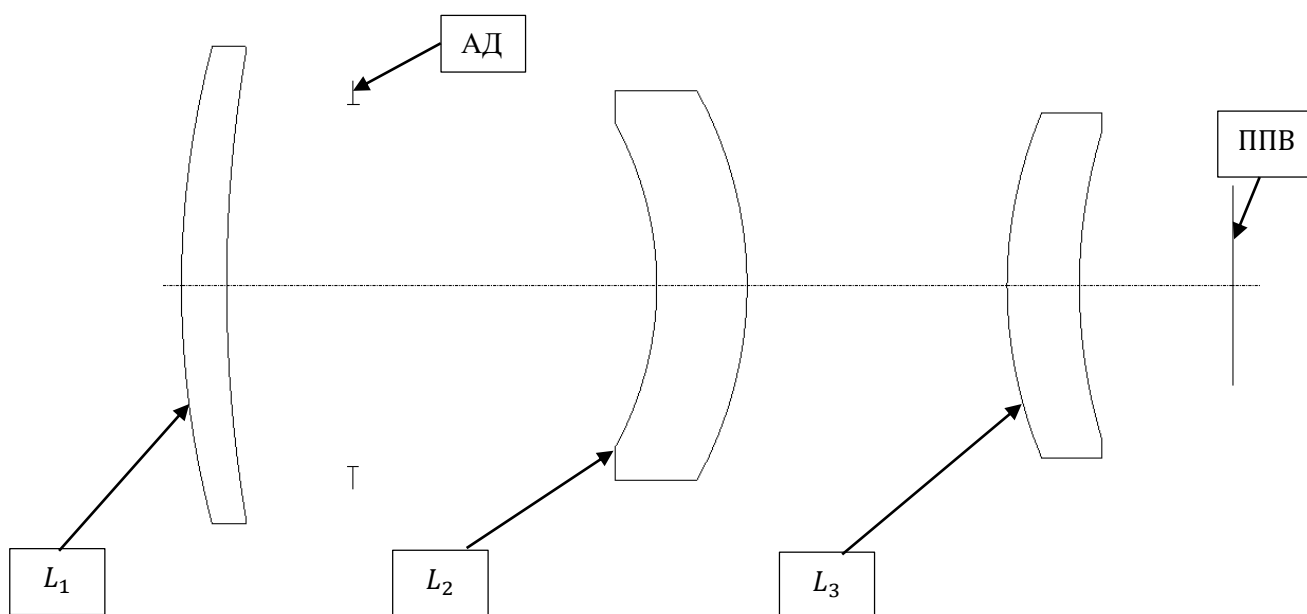


Рис. 2.2 – Оптична схема об'єктиву.

L – германієві лінзи (Ge);

АД – апертурна діафрагма;

ППВ – площа приймача випромінювання;

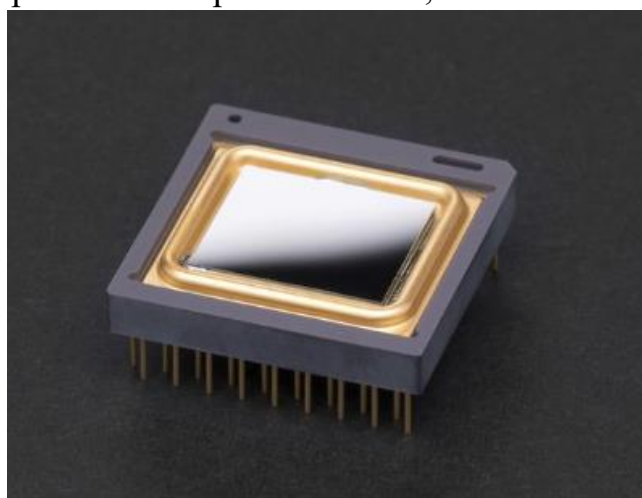


Рис. 2.3 - МПВ - Pico640S

РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРАХУНКИ

3.1 Габаритний Розрахунок

Основними вихідними даними для відбору необхідних компонентів тепловізійного прицілу є наступні параметри:

- Фокусна відстань об'єктива – 35 мм;
- Відносний отвір – 1:1;
- Спектальний діапазон мікроболометра – 8 ... 14 мкм;

Під час виконання роботи, за основу МПВ було взято мікроболометричну матрицю від компанії Lynred.

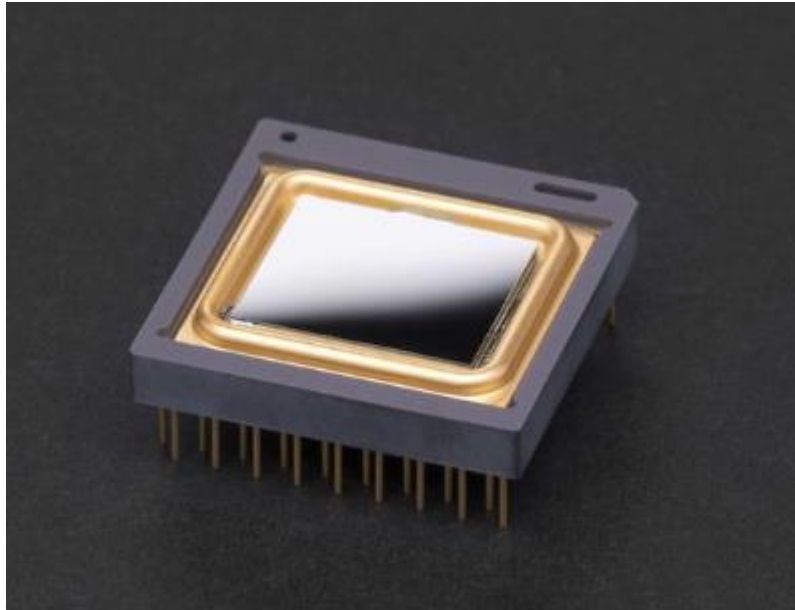


Рисунок 3.1 - МПВ - Pico640S.

- Назва і марка МПВ - Pico640S;
 - Формат – 640x480;
 - Розмір пікселя 17 мкм;
 - Частота кадрів – до 120 Гц;
 - Чутливість (NETD) - 30 мК при f/1;
- Діапазон робочих температур – від -40°C до +85 °C;

3.2 Розрахунок оптичної системи об'єктива

Розрахуємо основні характеристики об'єктива, використовуючи другий критерій відповідності роздільній здатності об'єктива і матриці випромінювання. Враховуючи, що розмір пікселів складає:

$v_d \cdot w_d = 17 \cdot 17$ мкм. Відповідно, знаючи розмір пікселя можемо розрахувати ширину, довжину та діагональ матриці.

Довжина матриці:

$$a = 640 \cdot 17 = 10880 = 10,88 \text{ мм};$$

Ширина матриці:

$$b = 480 \cdot 17 = 8160 = 8,16 \text{ мм};$$

Діагональ матриці:

$$l = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{10,88^2 + 8,16^2} = 13,6 \text{ мм};$$

У зв'язку з передовими технологіями, ми можемо знехтувати відстанню між пікселями, оскільки вона є настільки малою.

Для одноелементних приймачів випромінювання необхідно використовувати скануючу систему. Для визначення поля зору системи з матричним приймачем випромінювання застосовують формули 2.1 та 2.2, для яких необхідно знати розміри матриці (висоту і ширину) та задню фокусну відстань.

$$\tan w_{ox} = \frac{d}{f'} \quad (3.1)$$

$$\tan w_{oy} = \frac{h}{f'} \quad (3.2)$$

d – ширина матриці, h – висота матриці, f' - задня фокусна відстань.

Використавши формули 2.1 та 2.2 знайдемо значення поля зору для осі x та y . Фокусна відстань об'єктива $f' = 35$ мм, ширина матриці $d = 8.16$, висота матриці $h = 10.88$.

$$\tan w_{ox} = \frac{d}{f'} = \frac{10,88}{35} \approx 18.111^\circ$$

$$\tan w_{oy} = \frac{h}{f'} = \frac{8,16}{35} \approx 13.482^\circ$$

3.3 Енергетичний розрахунок

3.3.1 Розрахунок коефіцієнта пропускання оптичною системою

У оптичній системі, головними джерелами втрат є відбивання на границях оптичних середовищ та поглинання в матеріалах оптичних деталей. Для визначення світлового потоку, що потрапляє на вхід окуляра від дисплея, використаємо наступну формулу:

$$\tau_{oc} = T_R T_K \quad (3.3.1)$$

де $T_R = (1 - R_i)^M$ – коефіцієнт пропускання лінз із втратами на відбивання. (Френелівське відбиття [16])

M – число поверхонь оптичних елементів, що заломлюють світло;

R_i – коефіцієнт відбивання i -ої поверхні.

За законом Бугера-Ламберта $T_k = e^{-\alpha l} \approx (1 - \alpha)^l$ [15]. (3.3.2)

α_k – коефіцієнт поглинання ($0,027 \text{ см}^{-1}$) k – того елементу [14].

l – сумарна товщина всіх лінз вздовж оптичної осі (у см).

Розглянемо середній коефіцієнт пропускання для всієї оптичної системи. Так як ОС складається з трьох германієвих, то $R_i = 0,05$ [14], при покритті Ar/Ar .

$$T_R = (1 - 0,05)^6 = 0,735$$

Коефіцієнт послаблення для германієвих лінз рівний 0,027. Так як у системі всі три лінзи зроблені з германію, то $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0,027$. Отже,

$$T_k = (1 - 0,027)^{1,15} = 0,969.$$

Підставивши всі отримані значення отримаємо, що

$$\tau_{oc} = 0,735 * 0,928 = 0,712.$$

Отже, пропускання ОС становить 71,2%.

3.3.2 Розрахунок питомої виявлювальної здатності мікроболометричної матриці

Детекторна фігура засобу D^* є характеристикою його шумових властивостей. Вона залежить від різних факторів, таких як температура об'єкта (T_t), робоча температура детектора (T_D), довжина хвилі (λ) та частота модуляції випромінювання (f). Загалом, апроксимація функції D^* (T_t , T_D , λ , f) є складною задачею, тому значення D^* встановлюють для конкретних умов.

У теплових детекторах, падаюче випромінювання перетворюється на тепло, а зміна температури чутливого елемента створює електричний сигнал. Оскільки коефіцієнт поглинання випромінювання майже не залежить від довжини хвилі, теплові детектори є неселективними. Це означає, що їхня чутливість і детекторна фігура залишаються практично постійними в межах робочого спектрального діапазону $\lambda_2 \geq \lambda \geq \lambda_1$. Тому питома виявлювальна здатність визначається за формулою [17]:

$$D_{th}^* = \frac{4 \cdot k_{eff}^2}{\tau_0 \cdot NETD \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\delta M_{\lambda}(\lambda, T)}{\delta T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}} \quad (3.3.3)$$

Для того, щоб виконати обрахунки нам потрібно знати наступні величини:

- $k_{eff} = 1$ – ефективне діафрагмове число.
- $\lambda_1 \dots \lambda_2 = 8 \dots 14$ мкм – робочий спектральний діапазон.
- $NETD = 0,03$ К - еквівалентна шуму різниця температур.
- $\tau_{oc} = 0,71$ – коефіцієнт пропускання ОС.
- $A_D = 289$ мкм² - площа світлочутливого елементу ПВ.

Визначимо спочатку значення ефективної шумової смуги за наступною формулою:

$$\Delta f = \frac{f_d}{2} \quad (3.3.4)$$

Так як заявлена виробником максимальна тактова частота зчитування рівня 120 Гц, то

$$\Delta f = \frac{120}{2} = 60 \text{ Гц.}$$

Так як формула 3.3.3 доволі громізка давайте розглянемо окремо інтеграл, який знаходиться у цій формулі. У більшості випадків для вимірювання параметра NETD, який характеризує чутливість теплового зображувального пристрою, використовується тест-об'єкт з температурою $T=500$ К.

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\delta M_{\lambda}(\lambda, T)}{\delta T} d\lambda = 5,75 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \text{К}} \quad (3.3.5)$$

Після підстановки отриманих даних у 2.3.5 можемо підставити їх у формулу 3.3.3 і отримати:

$$D_{th}^* = \frac{4 \cdot 1^2}{0,71 \cdot 0,03 \cdot 5,75 \cdot 10^{-5}} \sqrt{\frac{60}{289}} = 1,49 \cdot 10^6 \frac{\text{см} \sqrt{\text{Гц}}}{\text{Вт}}.$$

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
						36
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3.3 Оцінка опроміненості в площині ПВ

Здатність ОС до концентрації енергії випромінювання характеризується енергетичною освітленістю E_{e0}' , яка формується на чутливій поверхні ПВ за заданої енергетичної яскравості об'єкта L_{et} . Для осьової точки вісесиметричної ОС спектральну освітленість визначають формулою [19]:

$$E_{\lambda 0} = \frac{\pi \tau_o L}{4 k_{eff}^2}; \quad (3.3.6)$$

Де $\tau_o = 0,71$ – спектральний коефіцієнт пропускання ОС.

$L = 5,925$ – освітленість об'єкта.

$k_{eff} = 1$ – ефективне діафрагмове число

У житлових приміщеннях рівень освітленості професійно заміряють вкрай рідко – це може траплятися лише тоді, коли після завершення будівництва висотної будівлі, маючи повне оздоблення та меблі, фахівці з'ясовують фактичні характеристики рівня комфорту для проживання. Ще однією причиною подібних заходів може виступити судовий розгляд, пов'язаний з тим, що певний об'єкт (який зазвичай знаходиться зовні будівлі) перешкоджає нормальному проникненню або розподілу світла у оселі споживача [18].

Для даного розрахунку було обрано значення 750 люкс, або ж $5,925 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2_{\text{ср}}}$, оскільки для співробітників, які постійно працюють з технічними кресленнями, документами та дрібними деталями, необхідно забезпечувати освітленість на рівні не менше 750 люкс.

Отже, підставивши наявні дані у формулу 2.3.6, отримаємо:

$$E_{\lambda 0} = \frac{\pi * 0,71 * 5,925}{4 * 1^2} = 3,304 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

3.4 Аберацийний розрахунок

Об’єктив складається з трьох лінз матеріалу Ge (германій). Для аналізу абераций використаємо програму «Aber». Ми встановлюємо всі необхідні параметри і внесемо основні параметри, які потрібно оптимізувати в систему, в редактор оціночної функції.

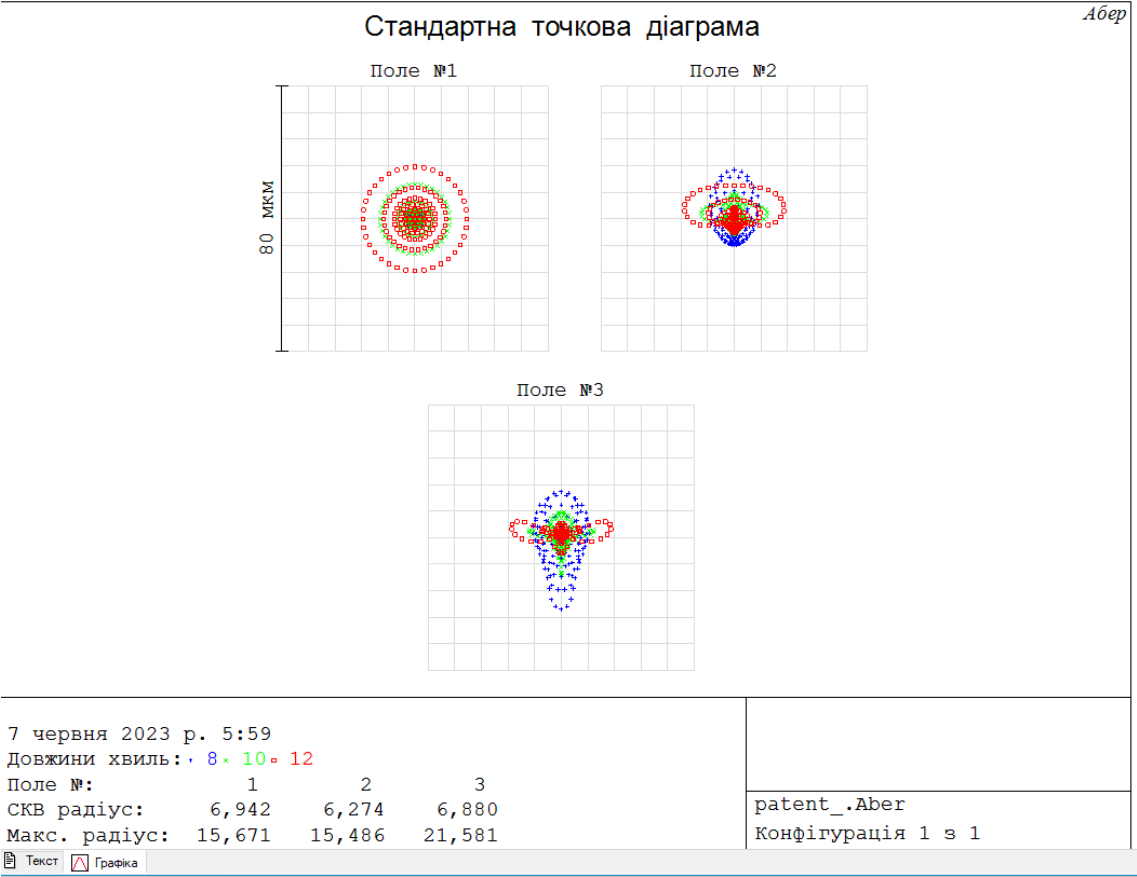


Рис. 3.4.1 – Точкова діаграма

Середній радіус аберації дорівнює 6,9 мм, максимальний – 15,7 мм;

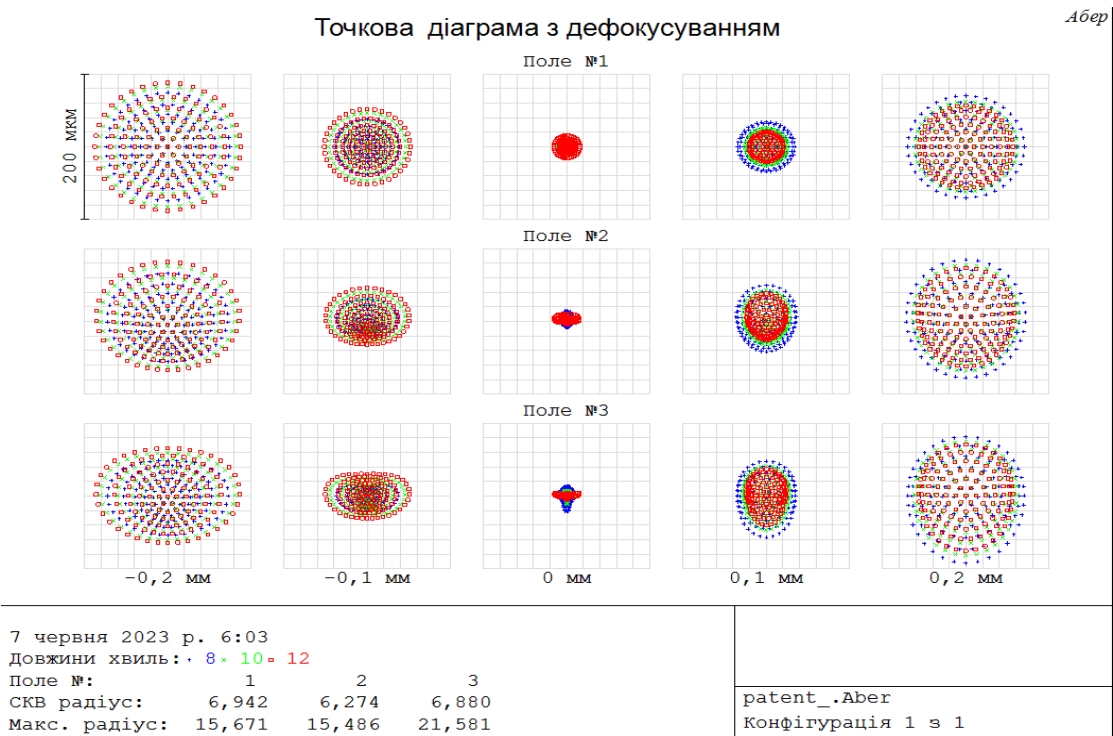
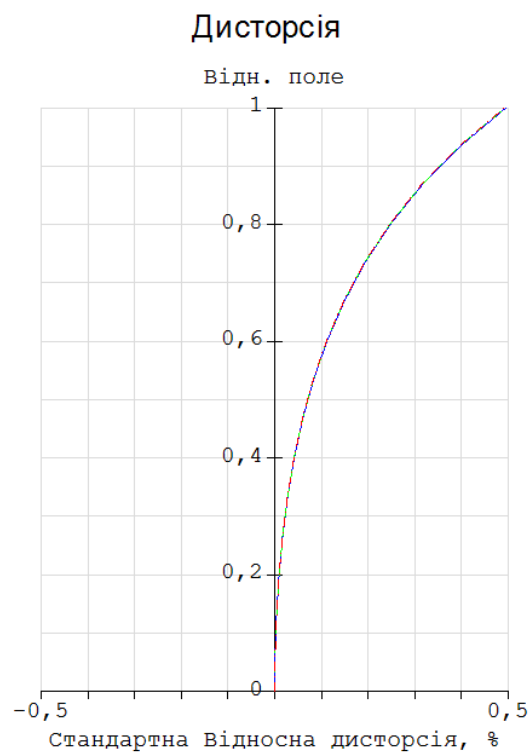


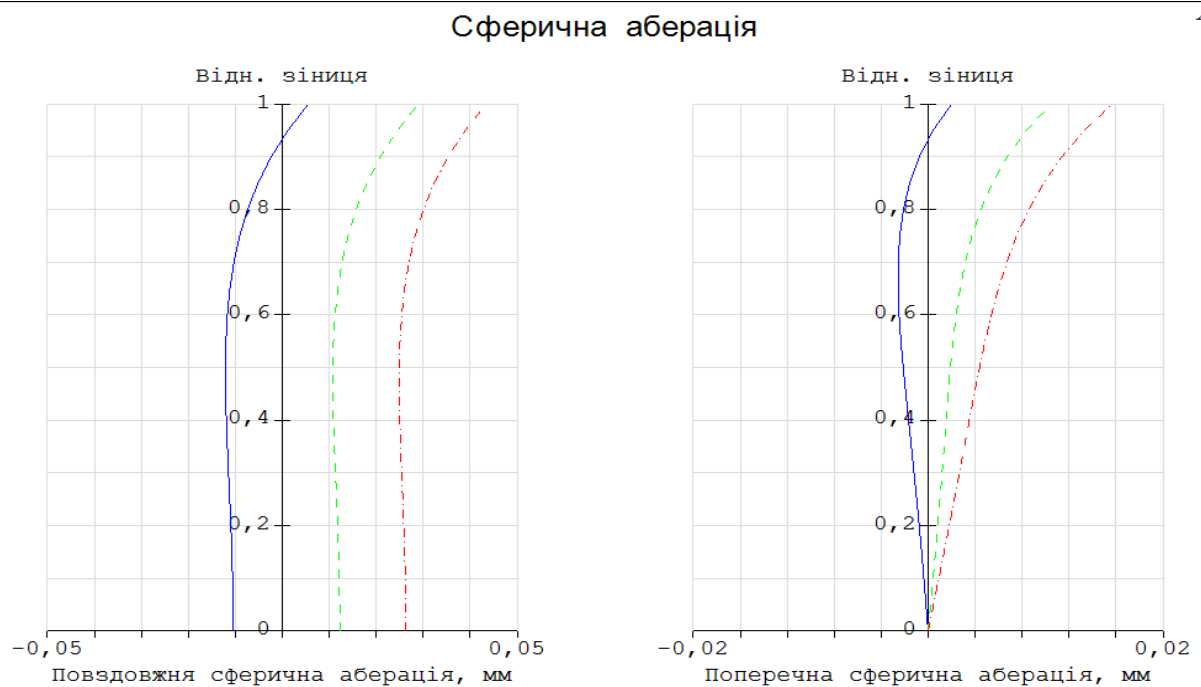
Рис. 3.4.2 – Точкова діаграма з дефокусуванням



7 червня 2023 р. 6:05
 Довжини хвиль: 8 10 12
 Макс. поле зору: 8,9°

Рис. 3.4.3. – Дисторсія

Максимальне поле зору: 8,9° (що повністю співпадає із заявленим кутом поля зору).
 Дисторсія не перевищує 0,5%.

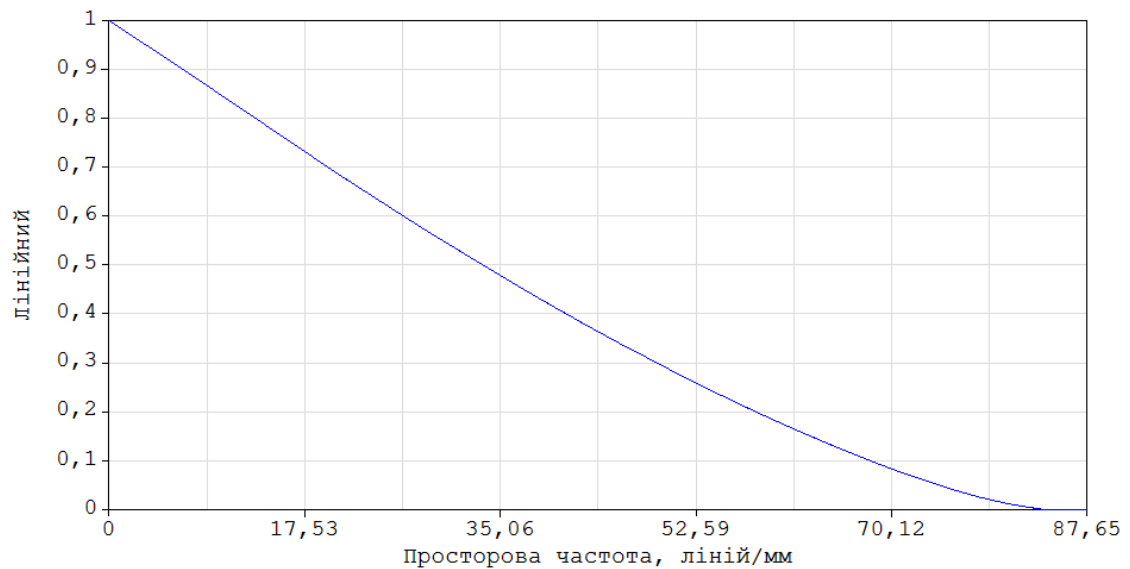


7 червня 2023 р. 6:53
 Довжини хвиль: 8 10 12
 Радіус вхідної зіниці: 12,194 мм

Рис. 3.4.4 – Сферична аберація

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

ПО91.00016.000 ПЗ



7 червня 2023 р. 6:39

Довжина хвилі: 8 мкм; Поле №1

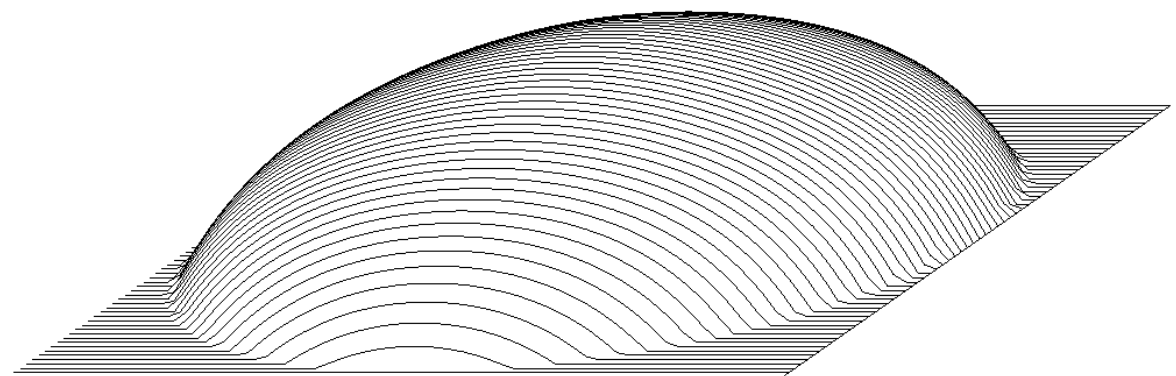
Переріз: Меридіональн. Сагітальн.

Рис. 3.4.5 – Модуляційна передавальна функція

Роздільна здатність системи досягає 86,29 ліній на міліметр.

Поверхня деформації хвильового фронту

Абер



7 червня 2023 р. 6:43

Довжина хвилі: 10 мкм; Поле №1

Перепад = 0,09149 λ , СКВ = 0,02468 λ

Поверхня: Зображення

Діаметр вихідної зіниці: -117,16 мм

patent_.Aber

Конфігурація 1 з 1

Рис. 3.4.6 – Хвильовий фронт

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

ПО91.00016.000 ПЗ

Лист

40

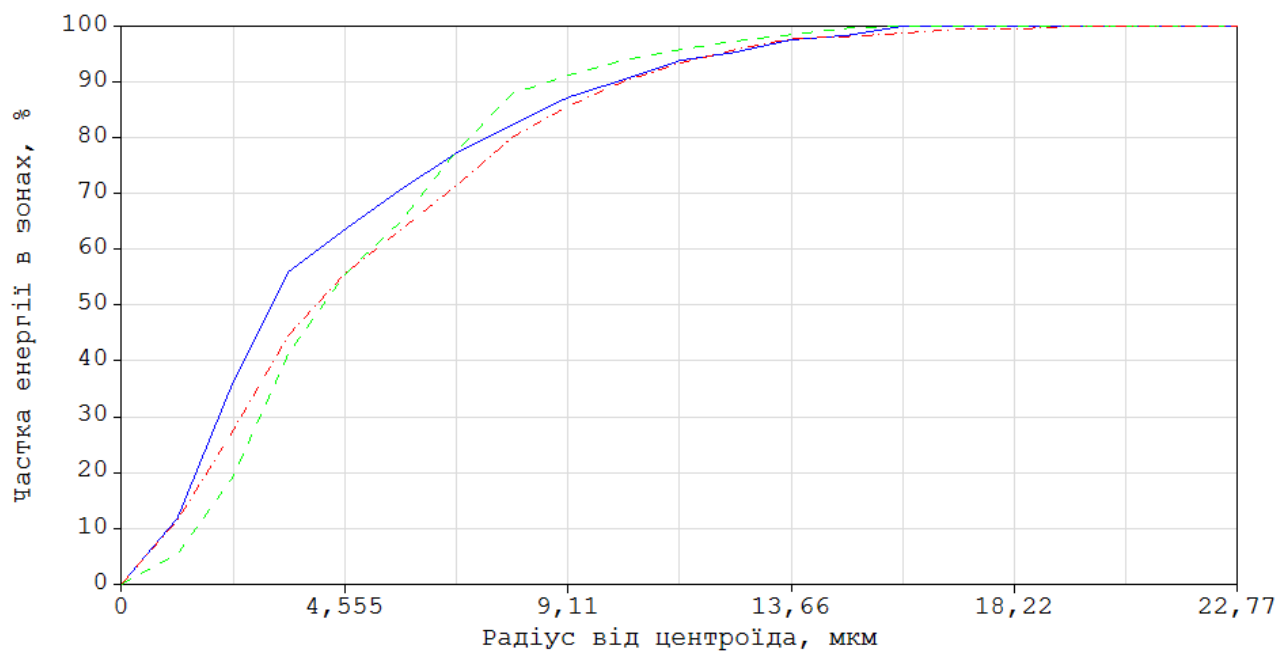


Рис. 3.4.7 – Геометрична ФКЕ

Залежність СКВ від поля

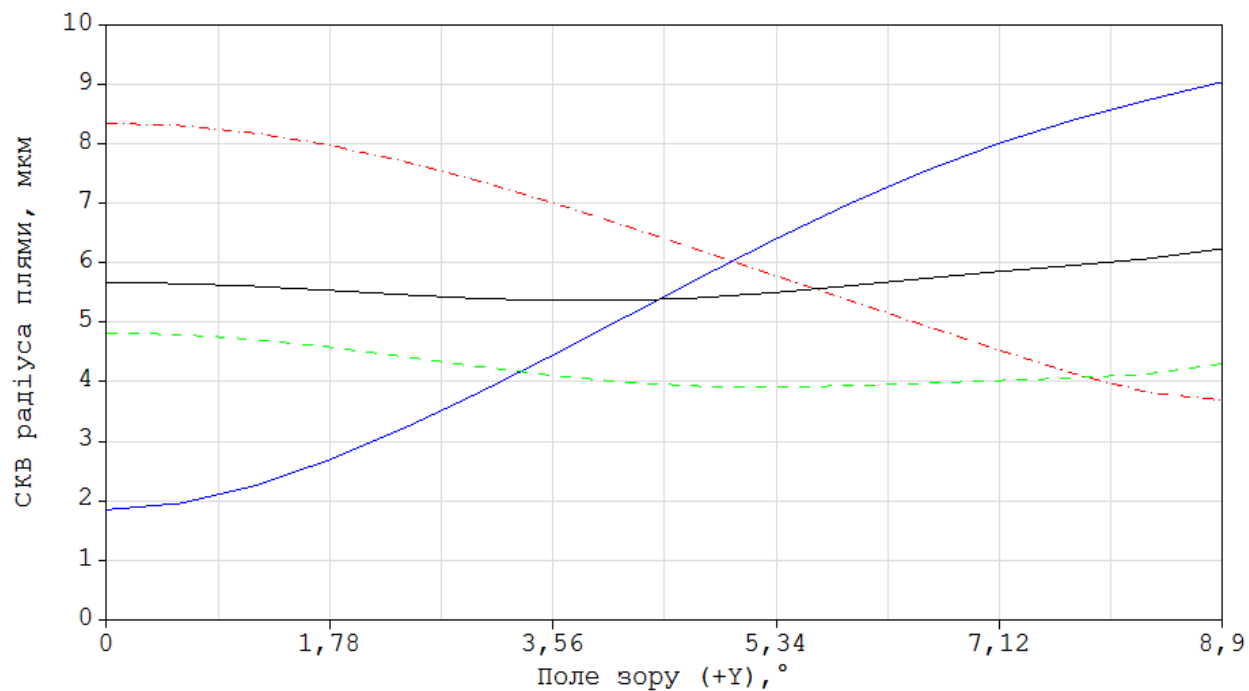


Рис. 3.4.8 – Залежність СКВ від поля

РОЗДІЛ 4. КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРОБКИ

Прилад складається з двох основних складових частин: оптичної системи з окуляра та електронного блоку.

Порядок складання приладу:

- 1) Дві лінзи за допомогою різьбових кілець кріпляться у блоці вихідної зіниці.
- 2) Лінза за допомогою притискного та різьбового кільця, яке виконує роль апертурної діафрагми, кріпиться у блоці вхідної зіниці.
- 3) Блок вхідної зіниці накручується на блок вихідної зіниці до упору за допомогою різьби.
- 4) Збірка об'єктиву за допомогою різьби вкручується у вузол матриці.

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		42

Висновок

Отже, у даному дипломному проекті було проведено аналіз тепловізійних систем, що базуються на використанні болометричних матриць. В результаті проведеного аналізу було встановлено, що сучасні тепловізійні камери застосовують неохолоджувальні мікроболометричні матриці з роздільною здатністю 640x480, 240x180, 384x288 і 80x60 пікселів. У цих пристроях використовуються 3-4 лінзи, виготовлені з матеріалів, таких як германій, селенід цинку, оксид ванадія та інші. Всі ці сучасні компоненти та їх різні комбінації дозволяють отримати системи з високим пропусканням світла та високою якістю зображення, що знайшли застосування у багатьох сферах.

Також, було здійснено аналітичний огляд аналогічних систем, що дозволило набрати певну кількість інформації, а саме характеристик, від яких можна було «відштовхуватись» впродовж розробки тепловізійної системи.

Також була розроблена оптична схема тепловізора та здійснено вибір відповідного інфрачервоного об'єктиву та болометричного приймача випромінювання. Виконано енергетичний та габаритний розрахунок розробленої системи.

					ПО91.00016.000 ПЗ	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		43

Використані джерела

- 1) Кононюк А.Е Основы фундаментальной теории искусственного интеллекта Книга 3
Зрительное восприятие изображений искусственным интеллектом Часть 4 Системы
тепловидения как расширяющие средства зрения в СИИ. Киев, Украина: «Освіта
України», 2017. – 480 с.
- 2) 2. ГОСТ Р 8.619-2006 Государственная система обеспечения единства измерений.
Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки. – Введ. 2007-01-01. –
М.: Стандартиформ, 2006. – 19 с.
- 3) Тепловізор PULSAR Quantum HD 38S <https://thermal-vision.com.ua/teplovizor-pulsar-quantum-hd-38s.html>
- 4) Тепловізійний приціл Skanda 60M https://opticstrade.com/teplovizionnye_pricely/teplovizionnyj_pricel_skanda_60m
- 5) Тепловізійна система Infray Xeye E2n <https://sotnyk.net/teplovizor-infray-iray-xeye-2-e6-v2>
- 6) Тепловізор Flir C2 https://prom.ua/ua/p1850493781-teplovizor-flir.html?utm_source=google_pmax&utm_medium=cpc&utm_content=pmax&utm_campaign=Pmax_cpa_50_b2b&gclid=CjwKCAjw-IWkBhBTEiwA2exyO8UPNyvv-dABcVt0O4CCxdgMB3LmoNQHkiSfmYjH3iFB1_cxkAJ8khoCai4QAvD_BwE
- 7) Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем
спостереження. Київ, НТУУ «КПІ», 2007. – 363 с
- 8) Що таке інфрачервона оптика? Вступ до інфрачервоної оптики.
- 9) Медичний тепловізор (діагностика) – медицина 2 <https://jak.koshachek.com/articles/medichnij-teplovizor-diagnostika-medicina-2.html>
- 10) _Темрографія будівництва https://geotop.com.ua/termografiya-zdaniy_ua.php

- 11) Тепловізійні системи В.Г. Колобородов, Н. Шустер.
- 12) Watanabe Y., Ando M., Kawaguchi K. Infrared Lens : заяв. пат. 13402765 США. – 2012. <https://www.freepatentsonline.com/y2012/0212808.html>
- 13) Германієві лінзи, германієві лінзи
https://alkor.net/germanium_windows_and_lenses.html
- 14) Закон Бугера-Ламберта <https://studfile.net/preview/5120779/page:35/>
- 15) Поліщук О. С. Комплексне удосконалення функціональних характеристик інтраокулярних лінз. – 2022.
https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/40683/1/IBB2020.4.4_04.pdf
- 16) 1)Власюк В.М., 1)Гордієнко В.І., 2)Колобородов В.Г., 1)НВК “Фотоприлад”, м. Черкаси, Україна; 2)Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна Особливості розрахунку освітленості, що еквівалентна шуму, для тепловізійних і телевізійних систем. – 2005.
<https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/11543/1/3.1.Pdf>
- 17) Як вимірюється освітленість у приміщенні? <https://5watt.ua/uk/blog/statti/yak-vimiryuyetsya-osvitlenist-u-primisshenni>
- 18) Теорія оптичних систем І.Г. Чиж Міністерство освіти і науки України Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2022

Додаток

					ПО91.00011.000 ПЗ	Лист
						46
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

