

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Міністерство освіти і науки України

Інститут інформаційних технологій

Кафедра метрології та інформаційно-вимірювальної техніки

Макаревич Олександр Федорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Дослідження тепловізійних методів і засобів контролю тепловтрат в системах

теплопостачання

(назва роботи)

Метрологія та вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка"

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня _____ Макаревич О. Ф.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Біліщук В. Б., к.т.н., доцент

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

_____ О. Є. Середюк

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформаційних технологій

Кафедра метрології та інформаційно-вимірювальної техніки

Освітній рівень магістр

Спеціальність 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка"

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МІВТ

«___» _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Макаревичу Олександровичу Федоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження тепловізійних методів і засобів контролю тепловтрат в системах теплопостачання

керівник роботи, Біліщук В. Б., к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від 11 грудня 2023 року №_

2. Строк подання студентом роботи 31 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: точність вимірювання температурних показників $\pm 1^\circ\text{C}$, спектральний діапазон роботи 8 – 14 мкм, кут поля зору об'єктива 40° , діапазон вимірюваних температур -10 – 450°C

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз методів діагностування витоків теплоносіїв. 2. Розроблення засобу контролю витоків теплоносіїв 3. Розроблення засобу тепловізійного контролю витоків . 4. Метрологічний аналіз

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

1. Основи теплового контролю. 2. Оптична схема системи. 3. Моделювання оптичної системи тепловізора. 4. Функціональна схема тепловізора. 5. Метрологічний аналіз. 6. Метрологічне забезпечення тепловізора.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
	Лютак З. П.		

7. Дата видачі завдання 11 грудня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз методів діагностування витоків теплоносіїв	22.12.2023 р.	
2	Розроблення засобу контролю витоків теплоносіїв	05.01.2024 р.	
3	Розроблення засобу тепловізійного контролю витоків	19.01.2024 р.	
4	Метрологічний аналіз	26.01.2024 р.	

Студент _____ Макаревич О. Ф. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Біліщук В. Б. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 61 с., 25 рис., 6 таблиць, 38 джерел, 6 аркушів креслень.

Об'єкт дослідження – процес виявлення витоків теплоносіїв у системах теплопостачання за допомогою тепловізійної системи.

Мета роботи – полягає у розробці тепловізійної системи для пошуку витоків теплоносіїв.

Метод дослідження – аналітичне дослідження тепловізійних методів і засобів контролю витоків.

У магістерській роботі було проведено дослідження теоретичних основ термографії, розроблено функціональну схему пристрою, синтезовано оптичну систему тепловізора, здійснено підбір електронних комплектуючих засобу тепловізійного контролю витоків теплоносіїв систем теплопостачання, зроблено метрологічний аналіз тепловізора, розроблено методику випробувань тепловізора.

ТЕПЛОВІЗІЙНА СИСТЕМА, ТЕПЛОВІЗОР, ДЕТЕКТУВАННЯ ВИТОКІВ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ТЕПЛОВІЗІЙНЕ БАЧЕННЯ.

ABSTRACT

Master's thesis: 61 p., 25 pictures, 6 tables, 38 sources, 6 sheets of drawings.

The object of research is the process of detecting coolant leaks in heat supply systems using a thermal imaging system.

The purpose of the work is to develop a thermal imaging system for finding coolant leaks.

The research method is an analytical study of thermal imaging methods and means of leak control.

In the master's thesis, research was conducted on the theoretical foundations of thermography, a functional scheme of the device was developed, the optical system of the thermal imager was synthesized, the selection of electronic components for the thermal image control of coolant leaks in heat supply systems was carried out, a metrological analysis of the thermal imager was made, and a method of testing the thermal imager was developed.

THERMAL VISION SYSTEM, THERMAL IMAGING, LEAK DETECTION,
AUTOMATION, THERMAL VISION

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Аналіз методів діагностування витоків теплоносіїв	8
1.1 Важливість точної та швидкої локалізації витоків теплоносіїв	8
1.2 Аналіз застосування тепловізійних засобів.....	9
1.3 Аналіз теплового випромінювання	12
1.4 Аналіз засобів тепловізійного контролю витоків теплоносіїв	16
Висновки до розділу	22
2 Розроблення засобу контролю витоків теплоносіїв	23
2.1 Аналіз функціональної схеми тепловізора	23
2.2 Моделювання оптичної системи тепловізора	24
Висновки до розділу	32
3 Розроблення засобу тепловізійного контролю витоків.....	34
3.1 Аналіз компонентів для побудови тепловізора	34
Висновки до розділу	39
4 Метрологічний аналіз	40
4.1 Поняття похибок вимірювань.....	40
4.2 Розрахунок похибок.....	42
4.3 Розроблення методики проведення випробувань тепловізорів	43
Висновки до розділу	54
Висновки	55
Список використаних джерел	56

ВСТУП

Актуальність теми. Однією з актуальних проблем у промисловості на сьогоднішній день залишається проблема своєчасного виявлення місць витоків газоподібних і рідких теплоносіїв в трубопроводах. При цьому, як показав проведений аналіз, найбільш поширеними місцями витоків є:

- зварні, фланцеві та різьбові сполуки, пошкоджені корозією;
- ділянки, уражені блукаючими струмами;
- місця механічних ушкоджень;
- приєднання контрольно-вимірювальних приладів та запірної арматури.

Устаткування для візуалізації витоків теплоносіїв досягло високого рівня розвитку та стало відносно доступним для великих виробничих та сервісних компаній уже понад десять років тому. Так, у США на державному рівні тепловізійний метод виявлення витоків внесений до списку рекомендованих до застосування на небезпечних промислових об'єктах. В Україні з початку надходження на ринок подібних приладів відзначається попит, що постійно зростає, диктується необхідністю і доцільністю їх використання як заміна відомим класичним способам виявлення витоків, до яких відносяться аудіовізуальні способи, періодичні обходи з використанням різних скануючих систем. Безсумнівно, частина з цих методів є швидкими, зручними у використанні, не потребують особливих навичок від обслуговуючого персоналу. У той же час застосування найбільш доступних варіантів пов'язане з підвищенням частки ризику пропуску витоків на ранніх стадіях їх формування.

Метод тепловізійної візуалізації витоків теплоносіїв використовується на об'єктах видобутку, транспортування, переробки та зберігання. Практично обов'язковими для застосування приладів та спеціально навченого персоналу будуть ділянки з великою кількістю потенційно можливих для появи витoku

елементів, а також важкодоступні місця, які розглядаються як необхідні для проведення планових перевірок на герметичність.

Мета і завдання дослідження. Аналітичне дослідження тепловізійних методів і засобів для пошуку витоків теплоносіїв.

Відповідно до цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати сучасні методи і засоби тепловізійного контролю;
- провести аналіз теоретичних основ термографії;
- спроектувати модель тепловізора;
- здійснити підбір комплектуючих тепловізійної системи;
- зробити метрологічний аналіз тепловізора.

Об'єктом дослідження є процес пошуку витоків теплоносіїв з використанням тепловізійної системи.

Предметом дослідження є детектування витоків теплоносіїв.

Методи дослідження. В роботі використано методи комп'ютерного моделювання при визначенні основних параметрів засобу контролю витоків теплоносіїв.

Наукова новизна отриманих результатів – вдосконалення засобів контролю витоків теплоносіїв систем теплопостачання за рахунок використання сучасних методів проектування і моделювання вузлів таких засобів.

Практичне значення отриманих результатів:

- зроблено аналіз методів і засобів контролю витоків теплоносіїв;
- зроблено моделювання оптичної системи тепловізора для контролю витоків теплоносіїв;
- розроблено структуру автоматизованої системи контролю осей колісних пар рухомого складу залізниці;
- запропоновано компоненти тепловізійної системи.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИТОКІВ ТЕПЛОНОСІЇВ

1.1 Важливість точної та швидкої локалізації витоків теплоносіїв

Сучасна промисловість – як видобувна, так і переробна – виробляє та використовує велику кількість різноманітних речовин у вигляді рідин. Їх витік може призвести до низки негативних наслідків:

- загроза отруєння людей;
- загроза пожежі чи вибуху;
- забруднення навколишнього середовища;
- посилення парникового ефекту;
- економічні втрати;
- та інші.

Тому необхідність своєчасного виявлення та усунення витоків очевидна.

Метод обмилювання місць можливого витоку використовують для газоподібних теплоносіїв. Цей дозволяє виявити точне місце витоку, і навіть локалізувати відразу кілька витоків на одній ділянці. Але мильний розчин призводить до корозії металів, що знижує термін експлуатації обладнання. Цей метод не можливо застосовувати на об'єктах, що знаходяться у місцях з мінусовою температурою. Також він трудомісткий і малоефективний.

Метод з використанням газоаналізатора не дозволяє точно визначити місце витоку і лише дає інформацію про перевищення концентрації газів якщо теплоносій є газоподібним або легко випаровується. Детектор приладу налаштовують на реєстрацію певних речовин та не може реєструвати витік інших. До плюсів можна віднести компактність та можливість використання кожним співробітником персонального приладу.

Акустичні детектори визначають витік різних типів теплоносіїв як газоподібних так і рідких, але діють на невеликій відстані, а інтерпретація їх

показань може бути складною навіть для досвідченого фахівця.

Оптичні детектори найдорожчий із представлених варіантів. Однак дозволяє визначати витік більшості газів, що використовуються в промисловості, на безпечній для людини відстані. За рахунок детектування інфрачервоного випромінювання можна визначити температуру газового факела.

1.2 Аналіз застосування тепловізійних засобів

Під тепловізорами слід вважати прилади, призначені для спостереження нагрітих об'єктів на предмет їх теплового випромінювання. Людське око сприймає дуже обмежену частину електромагнітного випромінювання – видиме світло. Цього достатньо, щоб побачити кольори, форми, але недостатньо, щоб охопити світ цілком. Людина відчуває теплову енергію та інфрачервоні промені лише тактильно, що незручно, оскільки неможливо визначити точну температуру і є ризик обпектися. Тому такі прилади перетворюють невидиме для людського ока інфрачервоне випромінювання в електричні сигнали, які після посилення та автоматичної обробки знову перетворюються у видиме зображення предметів. Іншими словами, тепловізор знімає «тепловий профіль» об'єктів і навколишнього середовища [1-3].

Застосування тепловізорів обумовлено необхідністю пошуку гарячих (іноді холодних) місць у температурному полі, наявність яких свідчить про порушення нормальної роботи об'єкта чи обладнання, небезпечні дефекти, втрати енергії тощо. Хороший тепловізор дозволяє не тільки локалізувати ці гарячі точки, але й виміряти їх температуру [4, 5].

В даний час області застосування тепловізорів стрімко розширюються і мають практично необмежений потенціал. Це обумовлено здатністю обладнання реагувати на найменші зміни температурних параметрів, які не помітні людському оку. Основною умовою роботи техніки є випромінювання електромагнітних хвиль,

що виходять від досліджуваного об'єкта.

Сьогодні тепловізійні системи використовуються в наступних сферах:

– у будівництві одним із основних напрямів термоконтролю є загальний енергетичний аудит будівель і споруд з метою оптимізації енергетичних витрат;

– іншим напрямком будівельної термографії є тепловізійний контроль систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря;

– серед інших напрямків тепловізійного контролю в будівництві можна виділити пошук місць проникнення вологи, пошук трубопроводів гарячої та холодної води та їх розривів;

– для ранньої діагностики можливих несправностей технічних пристроїв (місць перегріву технічних вузлів і деталей);

– сучасні мисливці часто використовують тепловізори для вистежування диких тварин;

– у медицині для ідентифікації інфікованого хворого за температурою тіла, визначення джерела захворювання та встановлення діагнозу;

– у промисловості прилади допомагають контролювати нормальний хід технологічних процесів і запобігати аварійним ситуаціям;

– наукові тепловізійні прилади допомагають проводити експерименти та лабораторні дослідження;

– тепловізори все частіше застосовуються у військовій справі як прилади нічного бачення для виявлення теплового контрасту в будь-який час доби;

– у роботі пожежників та МНС, щоб можна було знайти потерпілого в зоні поганої видимості та безпечно вибратися звідти тощо;

– дуже активно використовуються в охоронній сфері завдяки здатності бачити зловмисників у повній темряві;

– пристрої з високою чутливістю використовують правоохоронні органи Вони здатні показати, що хтось тримав дверну ручку близько тридцяти хвилин – на ручці залишаться розводи тепла;

– несправні механічні та електричні пристрої нагріваються через тертя,

коротке замикання та з інших причин. Тепловізори визначають нагрів без розбирання обладнання [6-9].

Основними сферами застосування промислових тепловізорів є теплові обстеження будівельних майданчиків, усунення несправностей електромереж, моніторинг виробничих процесів та інші випадки, коли про технічний стан контрольованих об'єктів можна судити за змінами теплового поля.

Завдяки різноманітним перевагам ці пристрої мають широкий спектр застосування. Розглянемо основні з них:

- відсутність безпосереднього контакту та віддаленість процесу контролю.
- Прилади можуть реєструвати показники відстані в кілька метрів від об'єкта;
- мобільність обладнання. Прилади мають невеликі габарити і вагу, що значно спрощує процес вимірювання;
 - швидкість вимірювання. Тепловізор дозволяє досліджувати велику кількість об'єктів за найкоротший час і з найменшими витратами;
 - наочність. Теплове зображення відразу ж відображається на екрані вимірювального приладу. Наприклад, обробка результатів і складання звіту тепловізійного обстеження будівельного майданчика займає в середньому 2-3 дні;
 - незалежність від розміру об'єкта. Можливість бачити дрібні (розміром до кількох сантиметрів) і дуже великі (розміром до сотень метрів) об'єкти за допомогою одного приладу;
 - безпека. Тест не шкодить здоров'ю людини.

Особливою перевагою таких приладів, як тепловізори, є те, що вони можуть представляти температуру досліджуваного об'єкта не у вигляді сухого набору цифр, а візуально. Це дозволяє побачити зв'язок між явищами, вловити загальні тенденції, що відбуваються. Але в той же час тепловізор також надає дуже точні дані про температуру. Таке унікальне поєднання наочності і точності відкриває перед тепловізорами величезні можливості в різних сферах людської діяльності.

Незважаючи на відносно високу вартість тепловізійних камер виявлення витоків, їх використання для моніторингу обладнання та трубопроводів може бути

вигідним у довгостроковій перспективі.

За допомогою тепловізора можна виявити витік в найкоротші терміни і без зупинки виробничого процесу, що особливо важливо у випадку з виробництвами, закриття яких може спричинити великі фінансові втрати. Можливості віддаленого моніторингу та роботи з інфрачервоним діапазоном дозволяють тестувати важкодоступні з'єднання. Своєчасний контроль і усунення витоків сприяє дотриманню екологічного законодавства і знижує ймовірність штрафів. Моніторинг температури з'єднань і деталей дозволяє запобігти витоку.

1.3 Аналіз теплового випромінювання

Усі нагріті тіла, як тверді, так і рідкі, характеризуються безпервним розподілом випромінювання з єдиним максимумом у спектрі електромагнітних хвиль, розташування якого безпосередньо залежить від температури об'єкта. Тобто чим більше теплової енергії випромінює об'єкт, тим вища його температура.

Під тепловим випромінюванням слід вважати електромагнітні хвилі різної довжини, які випромінює нагріте тіло за рахунок власної внутрішньої енергії. Наочно електромагнітний спектр теплового випромінювання зображено на рис. 1.1.

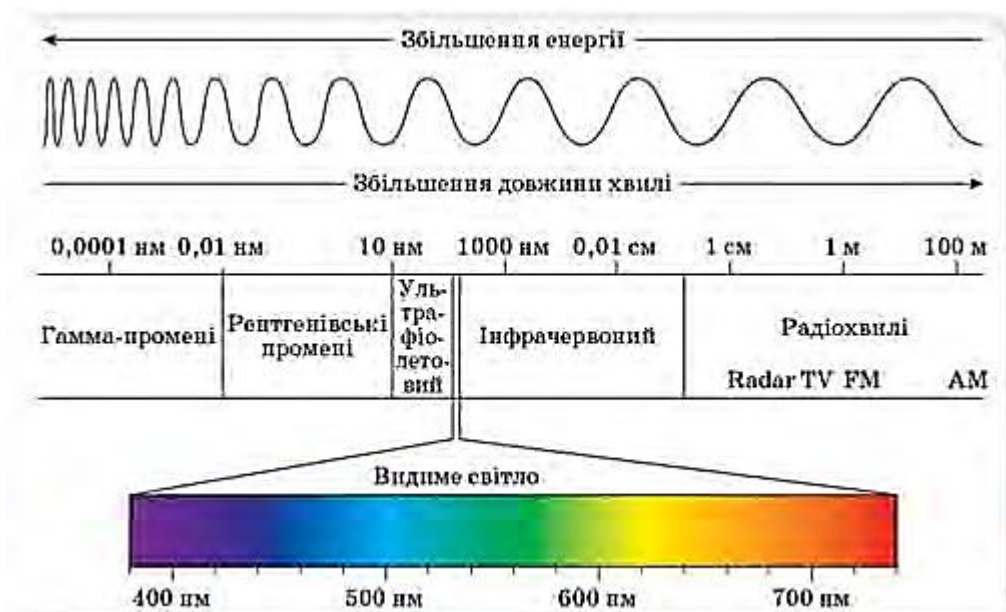


Рисунок 1.1 – Спектр випромінювання електромагнітних хвиль

Теплові промені видимі людським оком при температурі від 500 до 600 градусів за Цельсієм, тоді як інтенсивність світіння нагрітого тіла збільшується в рази зі збільшенням температури. Промені з довжиною хвилі до 40 мікрон відносяться до ультрафіолетового спектру, вони невидимі. Промені, видимі людським оком, коливаються від 0,40 до 0,75 мкм, а промені від 0,75 мкм до 400 мкм належать до інфрачервоного спектру випромінювання. При вимірюванні температури використовується зона інфрачервоного випромінювання і діапазон електромагнітних хвиль, видимих оком людини [10-13].

У фізиці для контролю температури нагрітих тіл і розрахунку теплового випромінювання використовується модель ідеального об'єкта – чорного тіла (blackbody) – тіла, яке поглинає все випромінювання будь-якої частини спектра електромагнітних хвиль. Крім поняття «абсолютно чорне тіло» існує ще поняття «сіре тіло» - тіла, які мають однакову здатність поглинання по всій довжині електромагнітної хвилі, мають спектр, подібний до спектру абсолютно чорного тіла. Загалом поглинальна здатність тіл залежить від довжини хвилі та температури, і їх спектр може суттєво відрізнятися від спектра чорного тіла [14-16].

Закон, створений науковим дуєтом Больцманом і Стефаном, є одним із фундаментальних законів теплового випромінювання. Закон свідчить, що всі тіла навколо нас випромінюють теплове випромінювання, оскільки вони завжди дорівнюють температурі абсолютного нуля $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$, тобто якщо абсолютна температура подвоїться, то інтенсивність випромінювання збільшиться в шістнадцять разів. Закон Стефана-Больцмана виражається коефіцієнтом випромінювання (q) чорного тіла, пропорційним четвертому степеню його абсолютної температури (T):

$$q = \sigma \cdot T^4, \quad (1.1)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (Вт/м}^2\text{)/K}^4$ – константа Стефана-Больцмана.

Щоб перейти до сірого тіла, потрібно коефіцієнт випромінювання (<1) помножити на результат. Варто зазначити, що закон Стефана-Больцмана враховує лише загальну випромінювану енергію.

Закон Кірхгофа показує відношення енергії випромінювання до поглинальної здатності A , є однаковим для всіх об'єктів при даній температурі T і не залежить від форми об'єкта, його хімічного складу тощо.

$$E(\lambda, T)/A(\lambda, T) = e(\lambda, T) \quad (1.2)$$

Тобто, чим більше енергії об'єкт поглинає на даній довжині хвилі λ при даній температурі T , тим більше енергії об'єкт випромінює при цій заданій температурі та довжині хвилі. Наприклад, поверхні з високим ступенем «чорноти» мають хорошу здатність поглинати теплову енергію і є хорошими випромінювачами такої енергії, чого не можна сказати про глянцевої поверхні, оскільки вони мають низьку здатність поглинання і низький коефіцієнт поглинання. Реальні тіла характеризуються коефіцієнтом поглинання менше одиниці, тобто мають меншу випромінювальну здатність, ніж абсолютно чорне тіло [17-19].

Значний внесок у розвиток радіаційної термодинаміки зробив видатний німець Вільгельм Він. Його закон описує зміну місця максимального розподілу енергії в діапазоні випромінювання абсолютно темного тіла. Тобто довжина хвилі ($\lambda_{\text{макс}}$), на яку припадає максимум енергії в спектрі повністю чорного тіла, обернено пропорційна його абсолютній температурі (T):

$$\lambda_{\text{макс}} = b/T, \quad (1.3)$$

де $b = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – константа Віна.

У 1900 році інший видатний німецький учений Макс Планк висунув гіпотезу про те, що кожен осцилятор випромінює і поглинає енергію кінцевими порціями, тобто квантами. У своїй гіпотезі Планк додав нову форму функції $f(\lambda, T)$, яка повністю узгоджується з експериментами:

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{\left(e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT} \right)} - 1 \right)} \quad (1.4)$$

де $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – константа Больцмана; $c=3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – швидкість світла у вакуумі; T – абсолютна температура; $h=6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – константа Планка; λ – довжина хвилі.

При заданих значеннях температури максимум інфрачервоного

випромінювання припадає на область, де спостерігається розсіювання енергії в спектрі випромінювання чорного тіла. Видима частина випромінюваної енергії відповідає заштрихованій частині рис. 1.2 і займає діапазон від 0,40 до 0,75 мкм [20-22].

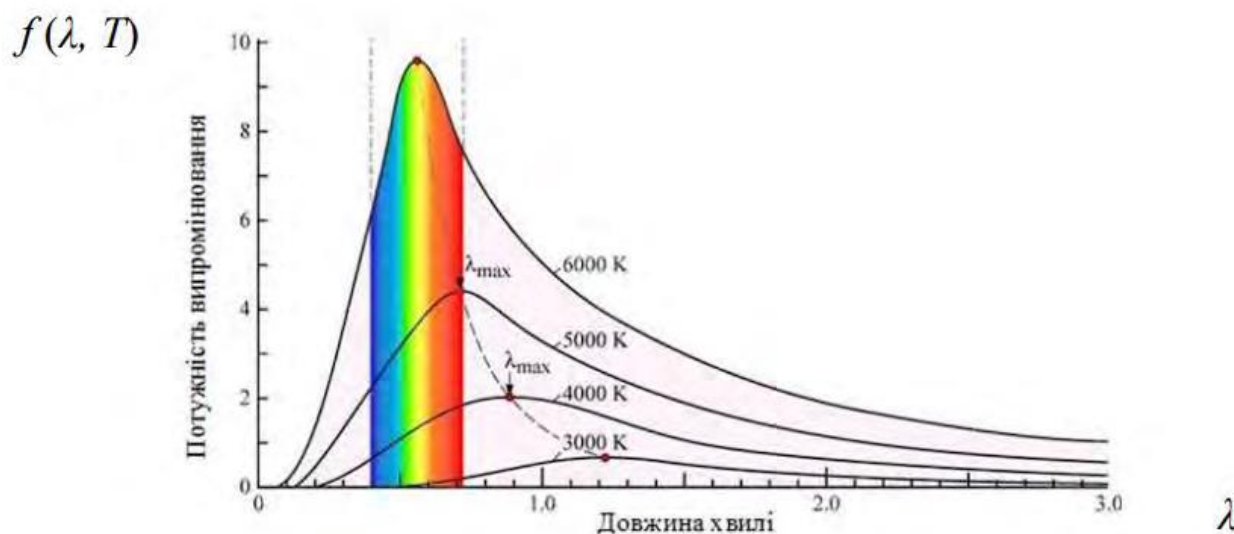


Рисунок 1.2 – Розподіл енергії у спектрі випромінювання при різних температурах

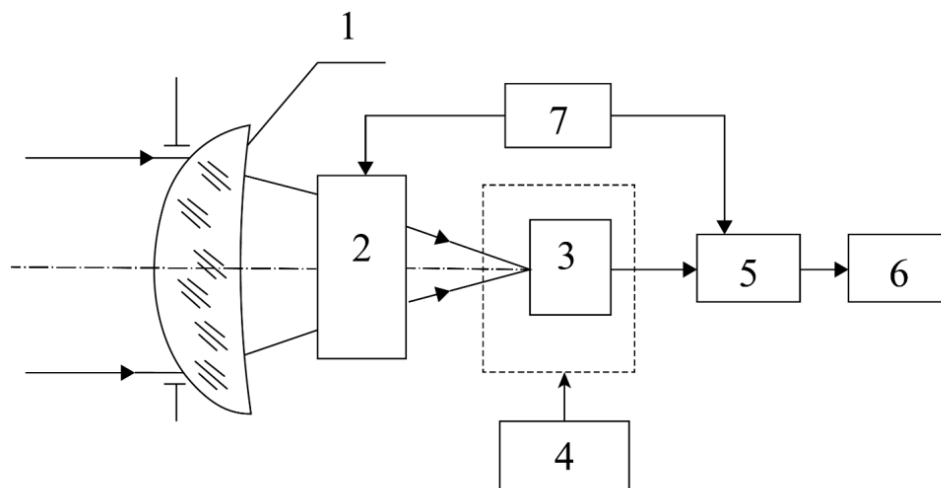
На рис. 1.2 показана залежність функції $f(\lambda, T)$ від довжини хвилі спектра випромінювання при різних рівнях температури. Тобто з підвищенням температури значення функції $f(\lambda, T)$ зростає по всьому спектру і рухається в бік максимального діапазону, який характеризується короткими хвилями [23-25].

Закони вчених Віна і Планка пояснюють появу світла у видимій області спектра нагрітого тіла. Закони свідчать, що при підвищенні температури домінує короткохвильове випромінювання. Тіла, нагріті до температури близько 500°C , випромінюють видиме для людського ока світіння. При поступовому зниженні температури нагрітим тілам властиво довгохвильове випромінювання, наприклад, ми можемо спостерігати перехід від білого світіння розпеченого тіла до червоного.

1.4 Аналіз засобів тепловізійного контролю витоків теплоносіїв

Як було сказано раніше, тепловізори — це оптико-електронні пристрої, які вимірюють температуру та її градієнт в інфрачервоному діапазоні спектра, а потім виводять на дисплей теплове поле досліджуваного об'єкта. Сучасні тепловізори складаються з таких основних вузлів: об'єктива, матриці (чутливого елемента) і електронного блоку обробки сигналу. Випромінювання інфрачервоного спектра через оптику фокусується на датчик випромінювання, який подає сигнал у вигляді змінної напруги або електричного опору, потім перетворюється в електронне зображення, тобто термограму, що виводиться на екран дисплея. Термограма — це зображення об'єкта, оброблене електронним способом для відображення на дисплеї, на якому різні градації кольорів відповідають розподілу інфрачервоного випромінювання на поверхні об'єкта. Таким чином, користувач пристрою 19 може переглядати термограму, що відповідає тепловому випромінюванню, що йде від поверхні об'єкта [27,28].

За принципом отримання зображення тепловізори слід розділити на скануючі та матричні. Особливістю скануючих тепловізорів, або, частіше їх називають тепловізорів з оптико-механічним скануванням, є термограма, отримана при скануванні простору. Функціональна схема скануючого тепловізора наведена на рис. 1.3.



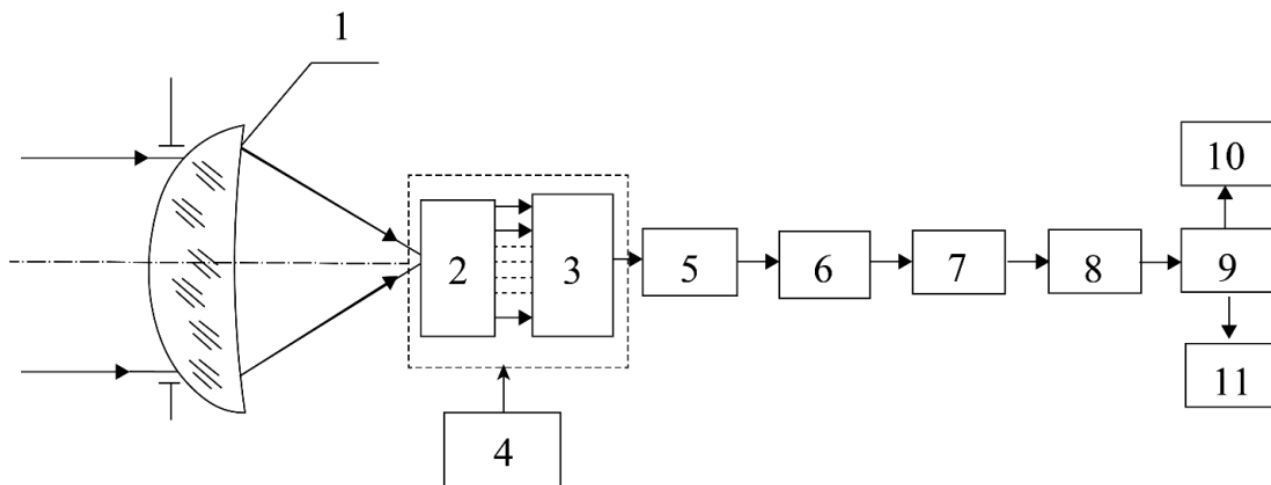
1 – оптична система; 2 – блок оптико-механічного сканування; 3 – датчик;
4 – система охолодження; 5 – електронний тракт; 6 – відеоконтролюючий пристрій; 7 – система синхронізації

Рисунок 1.3 – Функціональна схема скануючого тепловізора

Система використовує коливальні та обертові дзеркала, а також призми, щоб направити випромінювання від кожної точки спостережуваного простору до приймача. Приймач або датчик, що сприймає випромінювання, може бути одним елементом, лінією чутливих елементів або матрицею менших розмірів. Основна перевага використання скануючих пристроїв полягає в тому, що вимірювання виконуються за допомогою одного датчика в однокомпонентній системі. Недоліками є наявність рухомих елементів у конструкції та відносно швидке формування термограми [29-31].

Загалом, система пристрою повинна мати можливість сканувати простір об'єктів як у горизонтальному напрямку, так і у вертикальному напрямку рамки.

У фокальній площині своєї оптичної системи матричні тепловізори мають багатоеlementний приймач інфрачервоного випромінювання – матрицю. На рис. 1.4. Наведена проста схема матричного тепловізора.



1 – оптична система; 2 – фокальна матриця із підсилювачами; 3 – мультиплексор; 4 – система охолодження; 5 – коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів; 6 – аналогово-цифровий перетворювач; 7 – цифровий коректор неоднорідності; 8 – коректор; 9 – формувач зображення; 10 – дисплей; 11 – цифровий вихід

Рисунок 1.4 – Функціональна схема тепловізора з фокальною інфрачервоною матрицею

Кожна точка або піксель термограми є результатом трансформації інфрачервоного випромінювання досліджуваного об'єкта матричним сенсором. У сучасних матричних тепловізорах розміри матриці та тепловізора сильно відрізняються. Недорогі моделі на ринку тепловізійних систем мають матрицю 60x60 або 180x180 пікселів, а більш професійні пристрої мають вбудовану матрицю 640x480 пікселів. Розмір матриці сильно впливає на вартість тепловізора, оскільки матриця та ІЧ-оптика є найдорожчими компонентами тепловізорів [32-34].

Тому скануючі тепловізори використовуються для вузького кола конкретних завдань, де важливо використання унікальних функцій, тоді як матричні камери охоплюють цілий ряд більш практичних завдань.

За спектральним діапазоном теплові зображення поділяють на короткохвильові та довгохвильові.

Короткохвильові тепловізори мають ефективний спектральний діапазон від 3 до 5 мікрон. Ці пристрої краще називати середньохвильовими, оскільки вони працюють в середньохвильовому інфрачервоному діапазоні. Короткохвильовими

вони називаються тільки по відношенню до довгохвильових тепловізорів, оскільки тільки ці два спектральні діапазони використовуються в поширеній практиці управління тепловізором при тепловізійних вимірюваннях. Лінзи таких приладів виготовлені з кремнію [35, 36].

Довгохвильові тепловізійні матриці не вимагають додаткового охолодження, а робочий спектральний діапазон становить від 8 мкм до 14 мкм. Лінзи для даного типу приладів в основному виробляють з германію.

За типом виконання, тепловізори, поділяються на стаціонарні та переносні. Стаціонарний використовується для моніторингу певної території та передачі інформації по лінії зв'язку. Такі прилади активно використовуються в системах відеоспостереження, на виробництві для визначення температурного режиму рухомих об'єктів або поверхонь.

Портативні використовують для тепловізійної зйомки об'єктів у будівництві, енергетиці, промисловості та інших сферах. Сучасні моделі представлені у вигляді моноблока, який включає в себе оптику, матрицю, електроніку, дисплей, пульт управління, плату для запису і зберігання теплових зображень. Також Такі тепловізори можуть додатково оснащуватися камерами, лампами з додатковим підсвічуванням, лазерами та аудіогарнітурами. Портативні, компактні, їх вага може коливатися від 350 г до 2 кг, і вони можуть житися без проводів від батарей.

По можливості вимірювання температури тепловізори бувають:

- спостережні – візуалізують теплове випромінювання об'єкта, представляючи інтенсивність інфрачервоного випромінювання за допомогою обраної колірної шкали або, іншими словами, палітри;
- вимірювальні прилади, призначені для безконтактного вимірювання температури об'єкта та візуалізації температурних полів.

Тому, незважаючи на різноманіття тепловізорів, всі вони виконують однакову функцію – перетворення інфрачервоних променів у візуальні термограми, які виводяться на дисплей.

На сучасному ринку тепловізійних систем існує величезний асортимент різних моделей, що можуть відрізнятися одне від одної ціною, габаритністю, дизайном,

технічними характеристиками, різноманіттям функціонала, особливостями програмного забезпечення, наявністю застосунків для смартфонів тощо.

З типом матриці більшість представлених на ринку моделей оснащені QWIP-детекторами. Альтернативою їм є КРТ-пристрої. Але через складнішу експлуатацію та вищу вартість вони значно поступаються за поширеністю. Пристрої на квантових ямах мають більш низьку ефективність перетворення та більш високу чутливість до темного струму, проте для ефективного виявлення витоків їх характеристик достатньо.

Поле зору впливає розмір контрольованої області. Якщо потрібно спостерігати за відносно великим приміщенням, варто звернути увагу на цей параметр. Фокусна відстань впливає на дистанцію, з якої можна знайти витік. Для більшості представлених на ринку моделей фокусна відстань коливається між 0,25 та 0,8 м.

Тепловізійна камера моделі GF 706 призначена для швидкої реєстрації витоків SF6 та має діапазон спектральної чутливості 10,3-10,7 мкм з піком на 10,55 мкм. Вона оснащена QWIP-детектором, що охолоджується, з роздільною здатністю 320x256 пікселів, відеокамерою з роздільною здатністю 5 Мп, кольоровим OLED мікродисплеєм і 5-дюймовим LCD-екраном. Загальний вигляд тепловізора GF706 наведено на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 - Загальний вигляд тепловізора GF 706

Кілька режимів роботи, регульовані яскравість і контраст, колірна палітра, що настроюється, та інші додаткові функції дозволяють вирішувати широкий спектр завдань. Об'єм вбудованої пам'яті (SD) варіюється від 8 до 32 Гб, дані можна зберігати у форматі jpeg-зображень або MPEG-4 (для відео).

Тепловізійна камера моделі FG-106 має широкий набір додаткових функцій: корекція зображень, плавний зум, ізотермія, термографія та інші. Загальний вигляд тепловізора GF 106 наведено на рис. 1.6.



Рисунок 1.6 - Загальний вигляд тепловізора GF 106

Для визначення витоків на нафтохімічному виробництві використовують тепловізійні камери моделей GL 1000 та FG-100. Вони здатні швидко візуалізувати більшість вибухонебезпечних летких органічних сполук, здійснити точне визначення температури, оснащені видошукачем високої точності та дисплеєм з високою роздільною здатністю. Загальний вигляд тепловізійної камери GL 1000 наведено на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 - Загальний вигляд тепловізійної камери GL 1000

Всі прилади є компактними, переносними, можуть використовуватися в польових умовах та експлуатуватись у широкому діапазоні температур навколишнього середовища.

Висновки до розділу

Було розглянуто та проаналізовано теоретичні основи термометрії, що дало змогу зробити наступні висновки:

– поява тепловізорів відкрила перед ученими нові можливості для вивчення теплових процесів. Цей прилад дозволяє візуалізувати розподіл температури, наочно і що важливо, дає точну інформацію про ступінь нагріву різних частин досліджуваного об'єкта;

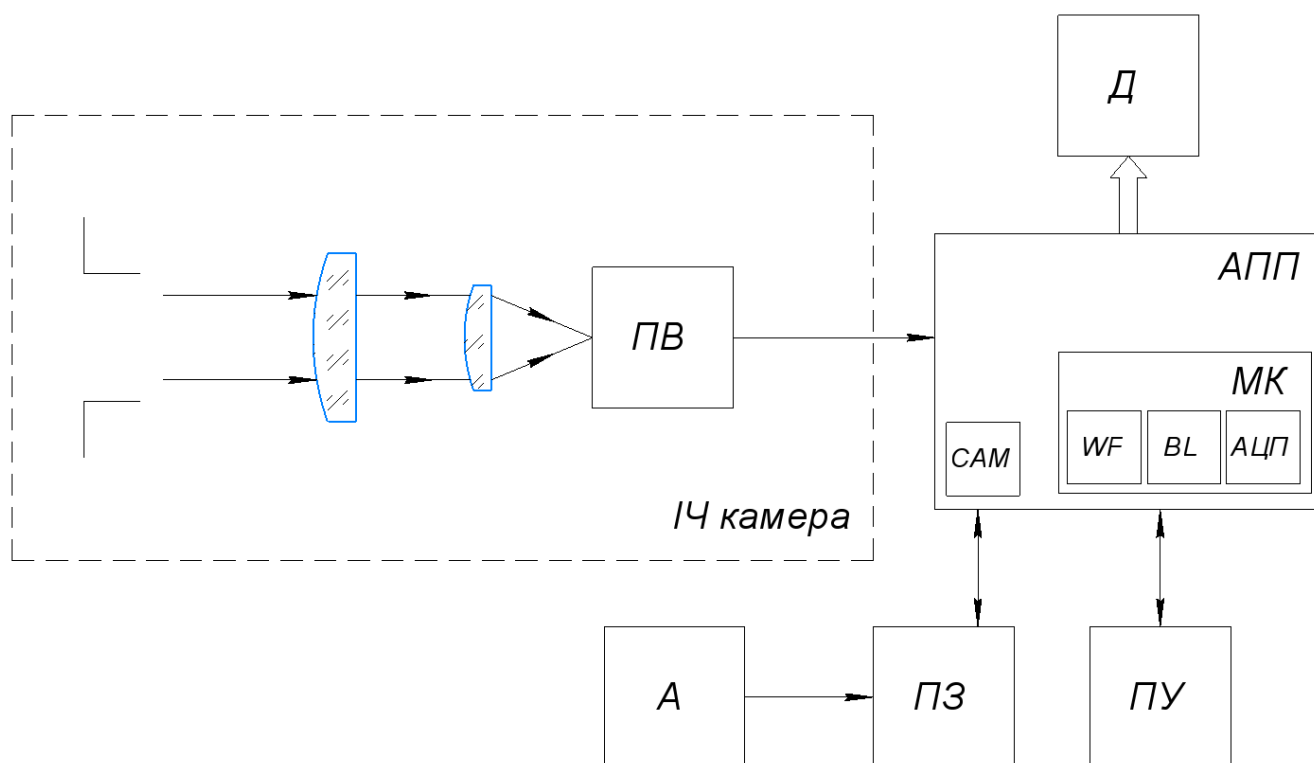
– розгляд основних закономірностей теплового випромінювання дозволив зрозуміти, на чому базуються теплові зображення та що лежить в основі їх роботи;

– огляд принципів роботи основних типів тепловізорів, основних представників цього типу приладів, дозволив мені глибше зануритися в конструкцію приладу, що згодом послужило міцною основою для проектування власного приладу.

2 РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ВИТОКІВ ТЕПЛОНОСІЇВ

2.1 Аналіз функціональної схеми тепловізора

Функціональна схема покликана відобразити процеси, що відбуваються у функціональних колах пристроїв. Функціональна схема тепловізійної системи представлена на рис. 2.1.



BL - Bluetooth-модуль, САМ – камера, WF – Wifi модуль, А – акумулятор, АПП - Апаратно програмна платформа, АЦП – Аналого - цифровий перетворювач, Д – дисплей, МК – мікроконтролер, ПВ - приймач випромінювання, ПЗ - Плата зарядки, ПУ - Пульт управління

Рисунок 2.1 – Функціональна схема тепловізора

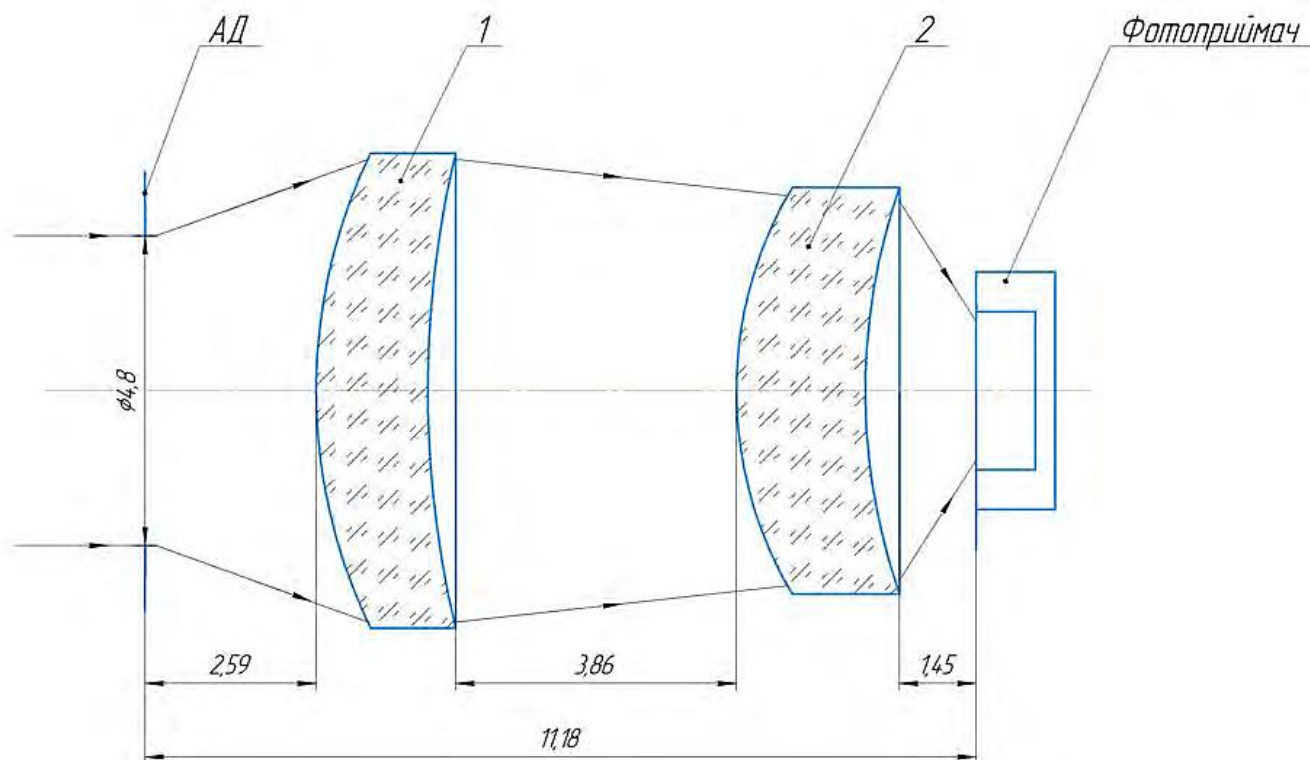
Інфрачервоні промені від досліджуваного об'єкта через оптичну систему приладу направляються і фокусуються на датчик, який приймає інфрачервоне випромінювання (ІЧ). З датчика вже оцифрований сигнал надходить на програмно-апаратну платформу (АПП) для подальшої обробки. Архітектура AMS вже включає

мікроконтролер (МК) ESP32 з 12-розрядним аналогоцифровим перетворювачем (надалі АЦП).

Варто відзначити, що мікроконтролер має вбудований модуль WI-FI і модуль Bluetooth, які можна використовувати для віддаленої передачі даних. АПП має 2-мегапіксельну камеру, яку можна використовувати для додаткових накладень теплового зображення, що повинно візуально покращити теплове зображення. Отримані результати вимірювань формуються в зображення, яке в залежності від температури перефарбовується в відповідний колір і виводиться на TFT дисплей (Д) діагоналю 2,8 дюйма. Управління пристроєм здійснюється за допомогою системи, що складається з сенсорних і механічних кнопок (ПУ). Джерелом живлення є літій-іонний акумулятор 18650(A), підключений до зарядної плати (ПЗ) з посиленням вихідного струму до 5 В.

2.2 Моделювання оптичної системи тепловізора

Враховуючи, що тепловізор буде використовуватись у виробничих умовах доцільно подбати про захист оптичної системи від механічних пошкоджень. Тому перед самою оптичною системою необхідно встановити захисну плоскопаралельну пластину. Після захисної пластини буде розміщена лінза для фокусування корисного світлового потоку на область приймача випромінювання. Оптична система буде складатися з двох меніскових лінз. Перша лінза з позитивним радіусом кривизни забезпечує збирання, та фокусування випромінювання на наступній оптичній поверхні. Після того, як випромінювання сфокусовано першою лінзою, воно потрапляє на наступну лінзу, яка служить для фокусування випромінювання на матриці детектора ІЧ-випромінювання (рис. 2.2).



АД – апертурна діафрагма; 1 – перша фокусуєча лінза; 2 – друга фокусуєча лінза

Рисунок 2.2 – Оптична схема запропонованої системи

Важливе значення, особливо для інфрачервоного діапазону, має матеріал, з якого виготовлені лінзи. Основна вимога до матеріалів оптичних лінз полягає в тому, що вони повинні пропускати випромінювання з довжинами хвиль, що покривають діапазон довжин хвиль, до якого чутливий детектор випромінювання.

Для роботи в дальньому інфрачервоному діапазоні знадобляться матеріали, придатні для цього діапазону. На основі зробленого аналізу було вибрано наступні оптичні матеріали: германій (Ge), сульфід цинку (ZnS), селенід цинку (ZnSe), оскільки вони мають високу пропускну здатність на бажаних довжинах хвиль, а саме:

- Ge – 2...15 мкм;
- ZnS – 1...14 мкм;
- ZnSe -1...22 мкм;

Крім того, як видно з діаграми на рис. 2.3. Оптичні матеріали на основі цинку мають значно більшу смугу пропускання для хвиль, які сприймає детектор. Це свідчить про те, що теоретично такі матеріали є найкращим вибором для

тепловізійної технології. Але насправді такі оптичні матеріали дуже дорогі та складні у виготовленні, тому включення таких матеріалів може значно збільшити собівартість виготовленого тепловізора.

В більшості випадків матеріал, який використовується для оптичної системи тепловізора, це – германій. З германію може бути виготовлена і плоска пластина, яка служить захисним склом тепловізора.

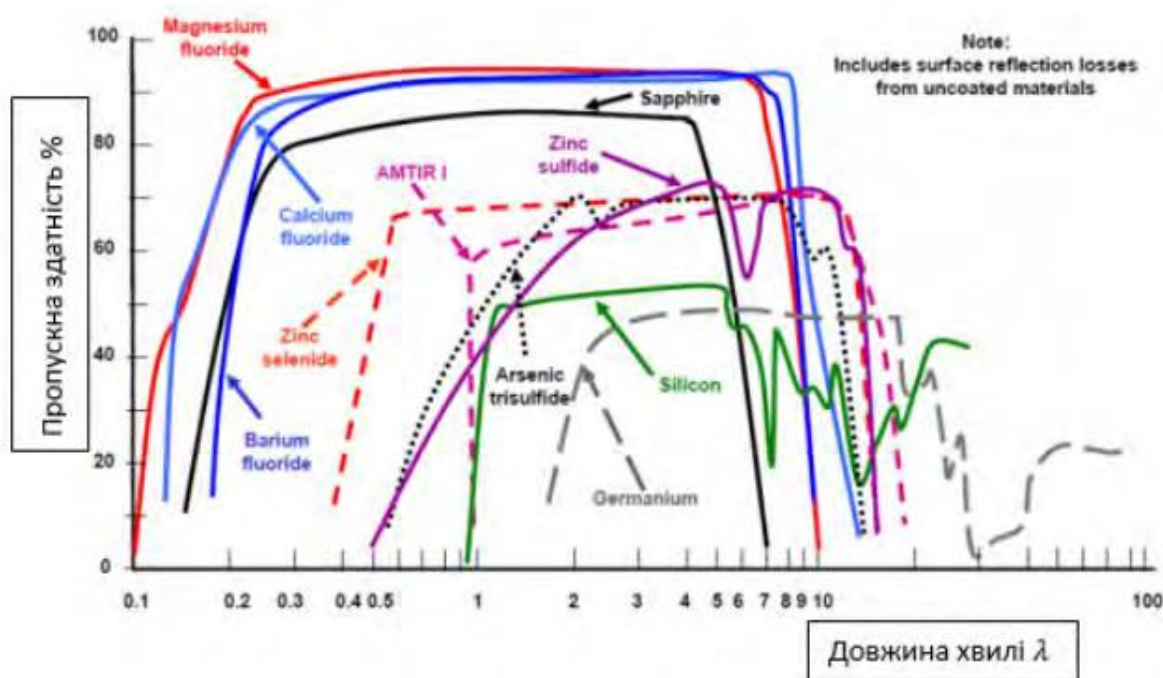


Рисунок 2.3 – Графік пропускної здатності матеріалів в ІЧ-спектрі

Першим кроком у моделюванні оптичної системи є вибір матеріалу, з якого вона буде виготовлена. Стандартним і найбільш розповсюдженим матеріалом для тепловізійних лінз є германій. Діапазон пропускання ним інфрачервоного випромінювання становить 8 – 14 мікрон, що дає можливість виявляти об'єкти за рахунок їх власного випромінювання. Тепловізор, який ми проектуємо, має в оптичній системі дві германієві лінзи, що дозволило сфокусувати зображення на обраній нами матриці та досягти великого кута огляду системи. Змоделюємо оптичну систему за допомогою програми Zemax. Конструктивні особливості системи наведені на рис. 2.4.

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000
STO	Standard		Infinity	2.593 V		2.400	0.000
2	Standard		9.285 V	1.500 V	GERMANIUM	3.610	0.000
3	Standard		11.769 V	3.859 V		3.320	0.000
4	Standard		5.648 V	1.776 V	GERMANIUM	3.087	0.000
5	Standard		6.834 V	1.453 V		2.449	0.000
IMA	Standard		Infinity	-		1.615	0.000

Рисунок 2.4 - Конструктивні параметри оптичної системи тепловізора у Zemax

Основними конструктивними параметрами було задано робочій спектральний діапазон $\Delta\lambda = 8 - 14$ мкм, розмір пікселя 40 мкм, кут поля зору $2\omega = 40^\circ$, діаметр вхідної зіниці $D = 3,8$ мм, відносний отвір $D / f' = 1 : 1$.

Відповідно до введених даних було отримано наступний вигляд моделі оптичної системи (рис. 2.5).

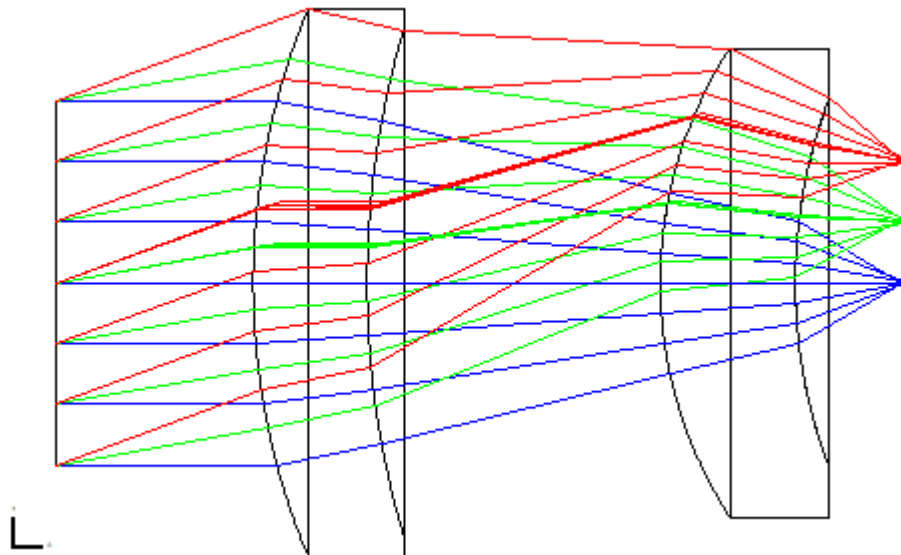


Рисунок 2.5 - Модель оптичної системи тепловізора

Функціонал Zemax також дав можливість отримати тіньову модель оптичної системи (рис. 2.6).

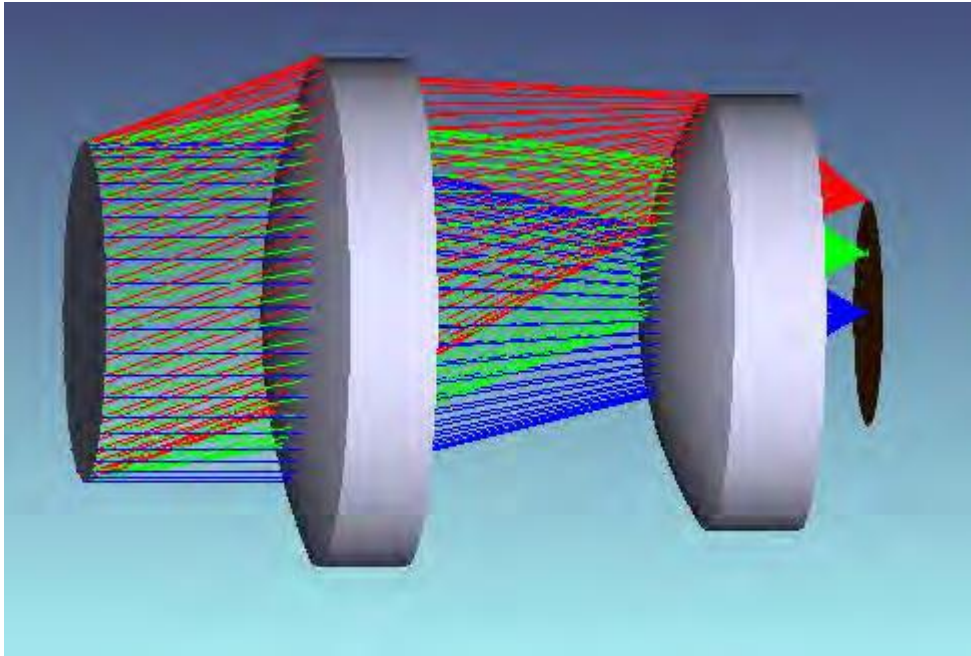


Рисунок 2.6 - Тіньова модель оптичної системи тепловізора

Як видно з малюнка, ІЧ-промінь проходить через систему лінз і фокусується безпосередньо на матриці детектора випромінювання.

На основі моделювання було отримано наступні параметри оптичної системи (рис. 2.7).

System/Prescription Data

File : C:\Users\Kai\Documents\Zemax\Samples\LENS.ZMX

Title:

Date : 05.12.2022

GENERAL LENS DATA:

```

Surfaces          :          6
Stop              :          1
System Aperture  : Entrance Pupil Diameter = 4.8
Glass Catalogs   : SCHOTT INFRARED
Ray Aiming       : Off
Apodization      : Uniform, factor = 0.000000E+000
Temperature (C)  : 2.000000E+001
Pressure (ATM)   : 1.000000E+000
Adjust Index Data To Environment : Off
Effective Focal Length : 4.631378 (in air at system temperature and pressure)
Effective Focal Length : 4.631378 (in image space)
Back Focal Length  : 1.549051
Total Track       : 11.18145
Image Space F/#   : 0.9648704
Paraxial Working F/# : 0.9648704
Working F/#       : 0.9821226
Image Space NA    : 0.4600973
Object Space NA   : 2.4e-010
Stop Radius       : 2.4
Paraxial Image Height : 1.685684
Paraxial Magnification : 0
Entrance Pupil Diameter : 4.8
Entrance Pupil Position : 0
Exit Pupil Diameter : 31.27407
Exit Pupil Position : 30.27143
Field Type        : Angle in degrees
Maximum Radial Field : 20
Primary Wavelength : 8 µm
Lens Units        : Millimeters
Angular Magnification : -0.1534817

```

Fields : 3

```

Field Type        : Angle in degrees
#      X-Value     Y-Value     Weight
1      0.000000    0.000000    1.000000
2      0.000000    10.000000   1.000000
3      0.000000    20.000000   1.000000

```

Vignetting Factors

#	VDX	VDY	VCX	VCY	VAN
1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Wavelengths : 3

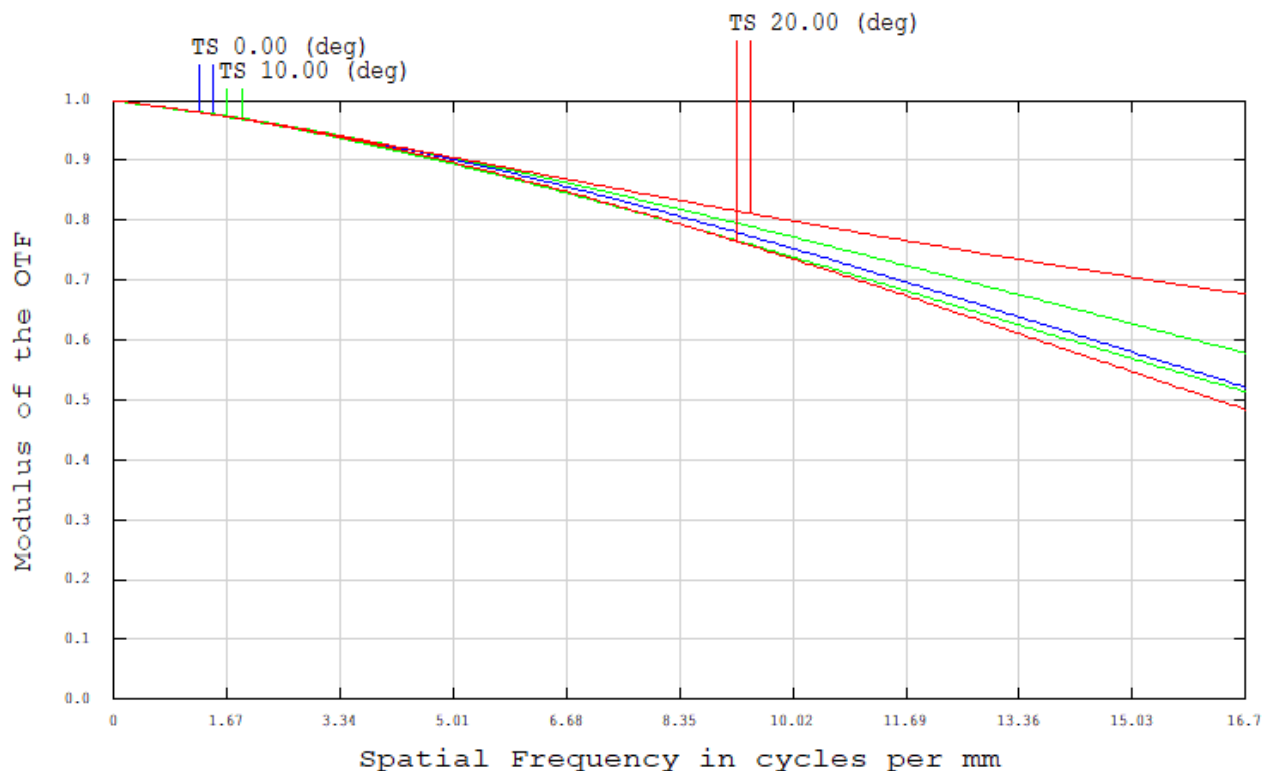
Units: µm

#	Value	Weight
1	8.000000	1.000000
2	10.000000	1.000000
3	12.000000	1.000000

Рисунок 2.7 – Звіт програми з результатами моделювання

Оцінимо якість зображення оптичної системи за просторово-частотними,

енергетичними та геометричними властивостями. Просторово-частотні характеристики відображає передавальна функція (рис. 2.8).



Polychromatic Diffraction MTF

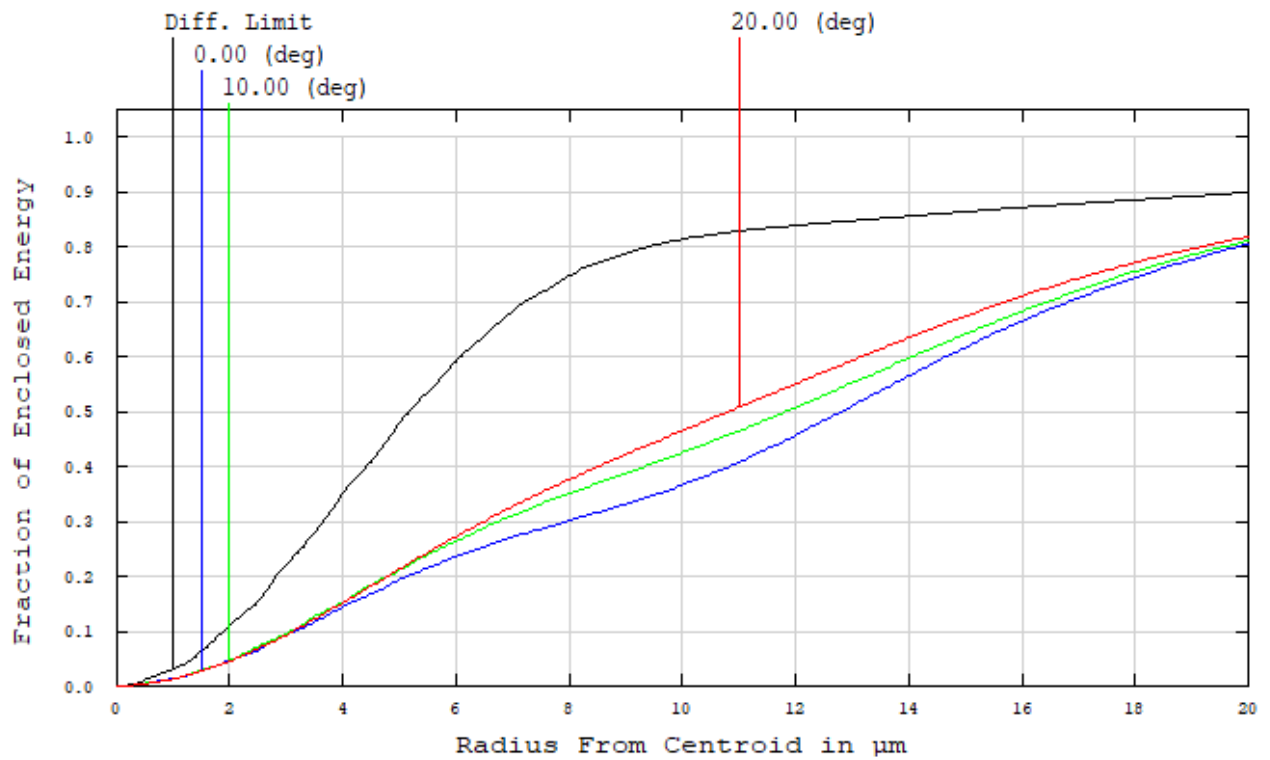
05.12.2022
Data for 8.0000 to 12.0000 μm .
Surface: Image

LENS.ZMX
Configuration 1 of 1

Рисунок 2.8 – Передавальна функція оптичної системи

На рисунку край поля зору об'єктиву $\omega = 20^\circ$ показаний червоним кольором, осьовий промінь з $\omega = 0^\circ$ зображено синьою лінією на графіку.

Оцінимо енергетичні характеристики оптичної системи за допомогою функцію концентрації енергії (рис. 2.9).



FFT Diffraction Encircled Energy

05.12.2022
Wavelength: Polychromatic
Surface: Image

LENS.ZMX
Configuration 1 of 1

Рисунок 2.9 – Функція концентрації енергії оптичної системи тепловізора

Геометричні характеристики оцінимо за допомогою діаграми плям розсіювання (рис. 2.10).

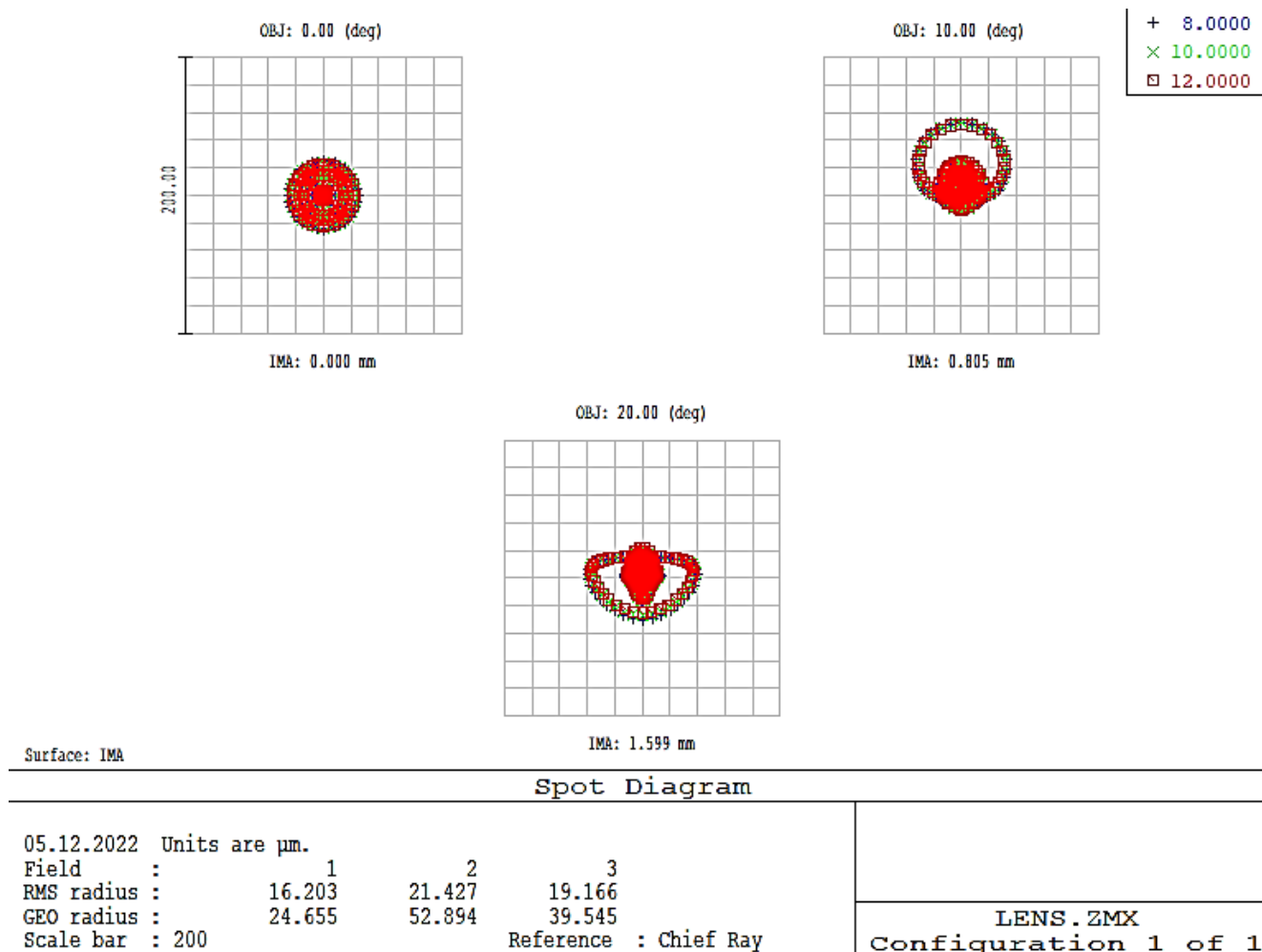


Рисунок 2.10 – Діаграма плям розсіювання оптичної системи тепловізора

Таким чином, запропонована змодельована оптична система тепловізора є достатньо оптимізованою та ефективною, що дозволить сконструювати досить точний за вимірюванням прилад.

Висновки до розділу

У другому розділі було зроблено аналіз і моделювання тепловізійної системи. Відповідно, були зроблені наступні висновки:

- створено функціональну схему приладу для тепловізійного обстеження об'єктів, яка стала міцною основою для створення проекту майбутнього приладу та дала змогу підібрати до нього найбільш оптимальні компоненти;
- проведено моделювання оптичної системи тепловізора в програмі Zemax, що

дало можливість оптимізувати систему та графічно її змоделювати;

– на основі розрахунків в програмі Zemax було створено оптимізовану оптичну систему, елементи якої забезпечують гарні результати отриманого зображення.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБУ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ ВИТОКІВ

3.1 Аналіз компонентів для побудови тепловізора

ESP32-CAM — це настроювана плата на основі модуля Wi-Fi/Bluetooth ESP32-S і камери OV2640 із вбудованим слотом для карт microSD. Таке вдале поєднання компонентів корисно при складанні багатьох пристроїв, зокрема, робототехніки, домашньої автоматизації, сканерів різноманітних графічних кодів, тощо. (рис 3.1).



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд апаратно-програмної платформи ESP32-CAM

Роздільна здатність матриці камери становить 2 мегапікселі. На платі є сильний білий світлодіод, який керується через GPIO. Модуль ESP32-CAM можна запрограмувати за допомогою Arduino IDE.

Ось основні технічні характеристики ESP32-CAM (табл. 3.1). Технічні характеристики ESP32-CAM ідеально підходять для побудови тепловізора. Основними перевагами такої АПП є: – зовсім невеликі габарити плати; – доступність; – економія часу за рахунок зручності використання; – технічні характеристики, які значно кращі за аналоги; – кросплатформенність – програмне забезпечення може бути встановлено на такі платформи як Windows, Linux і

macOS. ESP32-CAM користується високим попитом завдяки своїй зручності та універсальності.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики ESP32-CAM

Характеристики	Параметри
Підтримка Wi-fi мережі	802.11 b/g/n/e/i
Максимальна частота мікроконтролера	240 МГц
Об'єм ОЗП	520 КБ вбудований + 4М зовнішній PSRAM
Об'єм ПЗУ (в складі чіпу ESP32)	448 КБ
Об'єм ПЗУ (зовнішній чіп на платі)	32 Мбит
Напруга живлення	5В
Максимальний споживчий струм (Wi-fi, камера та підсвітка)	350 мА
Діапазон робочої температури	-20°C..+85°C
Розмір плати	40.5 x 27 мм

Дисплей 2.8» 240x320 TFT LCD SPI – графічний дисплей, що базується на контролері ILI9341 з керуванням через SPI. Роздільна здатність – 240×320 пікселів. Плата дисплею містить вбудований слот для карток SD (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд дисплея

Thin Film Transistor (TFT) – це варіант рідкокристалічного дисплея (LCD), який використовує тонкоплівкові транзистори для покращення якості зображення, наприклад адресації та контрастності. В його основі покладена матриця тонкоплівкових транзисторів. Коли подається напруга, кристали в матриці повертаються один до одного, що призводить до чорного кольору. Коли ми

вимикаємо напругу, кристали стають білими. Зміна напруги дозволяє створити будь-який колір на кожному окремому пікселі. Технічні характеристики дисплея наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 –Технічні характеристики дисплею 2.8" 240x320 TFT LCD SPI

Характеристики	Параметри
Інтерфейс	SPI
Робочий струм	3.3 В
Діагональ	2.8"
Розмір дисплея	59 × 48.96
Розмір плати	85 × 48
Роздільна здатність	240 × 320 пікселів

Основною перевагою TFT дисплеїв є їх відносно низька вартість виробництва порівняно з сучасними аналогами. Крім того, даний тип матриці має відмінну яскравість і час відгуку. Через це спотворення непомітні під час перегляду динамічних сцен.

Для задачі відображення теплового випромінювання витоків необхідно підібрати детектор, який буде найбільш ефективним для спостереження. Основним параметром інфрачервоного детектора є спектральний діапазон чутливості. Це діапазон довжин електромагнітних хвиль, які впливають на речовину, з якої виготовлено детектор.

Зазвичай для промислового використання використовуються детектори, чутливі до дальнього інфрачервоного спектрального діапазону 8–14 мкм.

Для використання в цьому тепловізорі було обрано детектор FLIR Lepton, оскільки він чутливий до потрібного спектрального діапазону інфрачервоного випромінювання та має деякі інші параметри, що набагато перевищують рівень його аналогів.

Матрична тепловізійна ІЧ-камера FLIR Lepton працює через інтерфейс I²C і має напругу живлення від 2,5 до 5 В. Датчик сумісний з багатьма платформами, зокрема Arduino, Raspberry Pi та STM (рис. 3.3).

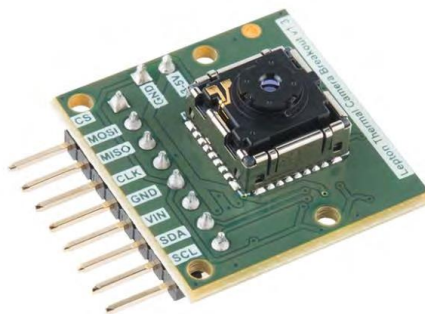


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд матричної тепловізійної камери FLIR Lepton

FLIR Lepton використовує масив теплових датчиків далекого ІЧдіапазону, які можуть виявляти інфрачервоний розподіл об'єктів у полі зору та перетворювати дані про температуру поверхні за допомогою обчислень, а потім генерувати зображення для вимірювань теплового зображення.

Наведемо основні технічні характеристики FLIR Lepton (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 - Технічні характеристики датчика FLIR Lepton

Характеристики	Параметри
Інтерфейс	CCI (I2C)
Діапазон температур	-10°C...450°C
Кут	50°×40°
Напруга	2.5В/5В
Роздільна здатність	80×60; ±1°C
Розмір	11.8×12.7×7.2 мм
Струм	<25мА
Частота	8.6Гц~76Гц

Основними факторами, що впливали на остаточний вибір саме цього датчика FLIR, були хороші технічні особливості, малі розміри та низьке енергоспоживання.

Мікросхема HT4928S має вмонтований підсилювач напруги до 5 В, що ідеально підходить для живлення апаратно-програмної платформи ESP32-CAM, крім того, має модуль powerbank для зарядки інших пристроїв (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Плата зарядки HT4928S з підсилювачем напруги

Технічні характеристики плати зарядки HT4928S наведено в табл. 3.4

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики плати зарядки NT4928S

Характеристики	Параметри
Вхідна напруга	5 В
Максимальний вхідний струм	1 А
Споживання струму в режимі очікування	8 мкА
Розміри	22 × 18 × 10 мм
ККД	85%
Вага	4 г

Літій-іонний акумулятор NCR18650B має ємність 3400mAh. Така батарея розрахована на роботу при малих і середніх струмах, що не перевищують 5-6 ампер, тобто її можна використовувати для більшості електроприладів, які потребують живлення від акумулятора (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Літій-іонний акумулятор NCR18650B

Мінімальна напруга під час розрядки – 2,5 В, максимальна під час зарядки – 4,2 В, номінальна напруга – 3,6 В. Акумулятор не має вбудованої плати захисту від розряду, тому його рекомендується використовувати з пристроями, які не допускають розряду нижче 2,5 В. Технічні характеристики наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики акумулятора NCR18650B

Характеристики	Параметри
Тип акумулятора	Li-Ion
Типорозмір	18650
Ємність	3200...3400 мАч
Робоча напруга	2,5...4,2 В
Максимальний струм	6 А
Максимальний струм заряджання	1,7 А
Температура навколишнього середовища при заряді	+10...+45 °С
Температура навколишнього середовища при розряді	-20...+60 °С
Внутрішній опір	~40 мОм
Розміри	18,5×65 мм
Вага	46 г

Термін експлуатації такого акумулятора складає 300 циклів зарядів та розрядів, при цьому ємність акумулятора може впасти до 80% від номінальної.

Висновки до розділу

У третьому розділі було обрано набір компонентів для проектування тепловізійної системи.

Основними компонентами пристрою є апаратно-програмна платформа ESP32-CAM, 2,8» 240x320 TFT LCD SPI – дисплей, матрична ІЧ-камера FLIR Lepton та додаткові компоненти, такі як зарядна плата і акумулятор. Набір компонентів, використаний для створення пристрою дає змогу створити компактний пристрій із гарною якістю зображення, який може бути реалізований в різних формах використання.

Такий вибір необхідних компонентів дозволить збільшити функціонал приладу в майбутньому, кожен із компонентів відносно доступний та досить бюджетний, що дає змогу сконструювати дешевий та ефективний тепловізор.

4 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ

4.1 Поняття похибок вимірювань

Похибка вимірювань - це відхилення результату вимірювання від дійсного значення вимірюваної величини. Завдання забезпечення потрібної точності вимірювань і його вирішення належить сфері метрологічного забезпечення. Похибка результатів вимірювання складається з багатьох складових.

Під час аналізу причин виникнення похибок, необхідно виділити ті, які суттєво впливають на результат вимірювання.

Розрізняють абсолютну і відносну похибки. Абсолютною похибка показує на скільки результат вимірювання відрізняється від істинного значення [37]:

$$\Delta = A - X_{ICT}, \quad (4.1)$$

де Δ - абсолютна похибка вимірювань; A - результат вимірювання; X_{ICT} , - дійсне значення вимірюваної величини.

Абсолютна похибка має ті же одиниці, що й вимірювальна величина.

Відносною похибкою вимірювань є відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини:

$$\delta = \frac{A - X_{ICT}}{X_{ICT}} \cdot 100 = \frac{\Delta}{X_{ICT}} \quad (4.2)$$

Похибки засобів вимірювання ділять на методичні та інструментальні. Інструментальні похибки є в кожному засобі вимірювань, вони можуть бути визначені при його випробуваннях і занесені в паспорт на цей засіб. Методичні похибки пов'язані з вибраним методом вимірювань величини.

Крім методичні та інструментальні похибок розрізняють статичну і динамічну похибки засобу вимірювання. Статична похибка не залежить від швидкості зміни вимірюваної величини в часі. Динамічна похибка залежить від швидкості зміни вимірюваної величини в часі. Динамічна похибка виникає через інерційність

елементів засобу вимірювання. Динамічну похибку засобу вимірювання розраховують як різницю між похибкою засобу вимірювання в динамічних умовах та його статичною похибкою.

Залежно від можливості усунення і причин виникнення розрізняють систематичну та випадкову похибки. Систематична похибка вимірювань є постійною або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини. Причинами виникнення систематичної похибки є: відхилення параметрів засобу вимірювання від розрахованих значень передбачених схемою; неврівноваженість деталей відносно осі обертання, що призводить до додаткового провороту деталі за рахунок зазорів, що є в механізмі; похибка градування або зсув шкали; знос і старіння робочих поверхонь деталей; несправність засобу вимірювання і т. д. Систематичну похибку виявляють при повірці шляхом порівняння робочих засобів вимірювання з зразковими і усувають проведенням калібрування.

Випадкова похибка виникає чи змінюється випадковим чином при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини. Випадкова похибка виникає при одночасній дії багатьох джерел в певні моменти часу. Вплив кожного джерела на результат вимірювань неможливо передбачити і вони мають випадковий характер у своєму вкладі в сумарний вплив.

Похибки засобу вимірювань, які залежать від величини вхідного сигналу називаються мультиплікативними, а ті що не залежать - адитивними.

Похибка квантування характерна для цифрових засобів вимірювання, яка виникає при наявності дискретних перетворювачів. Похибка квантування Δ_k є методичною похибкою вимірювань і як правило притаманна засобам вимірювань в яких неперервна вхідна величина перетворюється в дискретну (квантується за рівнями, наприклад в аналого-цифровому перетворювачі). Похибка від квантування рівна різниці між результатом виміру без попереднього перетворення величини сигналу N_x і дійсним значенням величини сигналу X :

$$\Delta_k = x_N - X \quad (4.3)$$

4.2 Розрахунок похибок

Розглянемо складові сумарної похибки (рис. 4.1) електронного блоку теловізора [37].

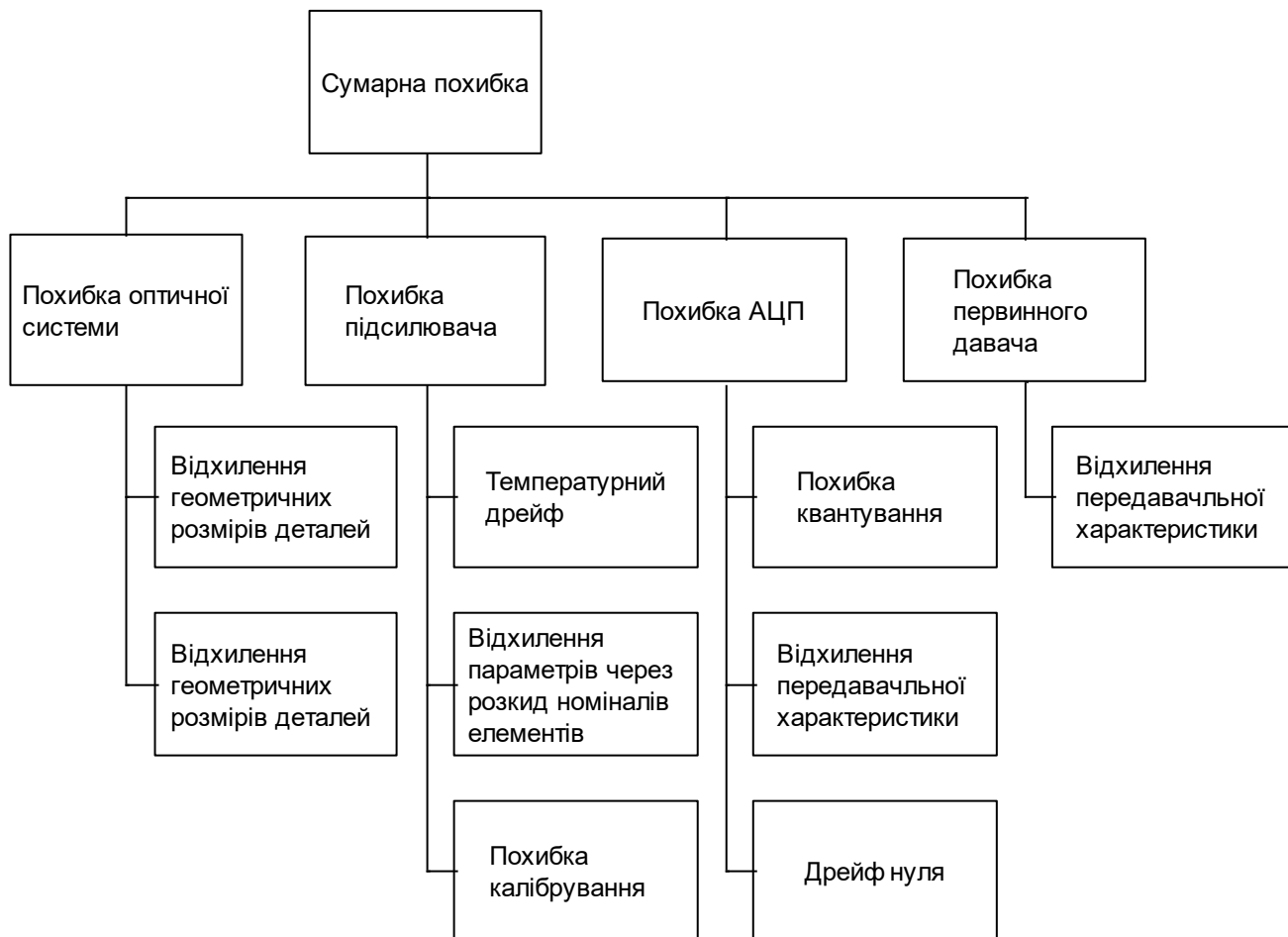


Рисунок 4.1 – Схема нагромадження похибок

Для розрахунку сумарної похибки необхідно знайти СКВ кожної складової σ_i . Для цього розрахуємо абсолютну похибку кожного елементу схеми теловізора за формулою:

$$\Delta_{U_i} = \frac{\delta_i \cdot U_{НОМ.i}}{100} \quad (4.4)$$

Розрахуємо СКВ, кожного елемента з врахуванням коефіцієнта Стюдента z , вважаючи, що розподіл похибок всіх елементів, є нормальним. Для нормального закону розподілу $z=1,96$ [37]:

$$\sigma_i = \frac{\Delta_i}{z} \quad (4.5)$$

Знайдемо суму СКВ:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum \sigma_i^2} . \quad (4.6)$$

Обчислимо суми СКВ для різних елементів:

$$\sum \sigma_{Ri}^2 = 1,77$$

$$\sum \sigma_{Ci}^2 = 1,77$$

$$\sum \sigma_{VDi}^2 = 1,77$$

$$\sum \sigma_{DAi}^2 = 1,77$$

Остаточо отримуємо:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{1,77 + 2,6 + 0,12 + 1,68} = 6,17 .$$

Обчислимо сумарну абсолютну похибку:

$$\Delta_{\Sigma} = \sigma_{\Sigma} \cdot z . \quad (4.7)$$

Отже, отримуємо:

$$\Delta_{\Sigma} = 6,17 \cdot 1,96 = 12,09 .$$

Обчислимо сумарну відносну похибку:

$$\delta = \frac{\Delta_{\Sigma}}{U_{вих.нам}} \cdot 100 = \frac{12,09}{220} \cdot 100 = 5,5 \text{ \%} .$$

4.3 Розроблення методики проведення випробувань тепловізорів

Операції та засоби проведення випробувань. При проведенні випробувань тепловізорів виконують операції та застосовують засоби, наведені в таблиці 4.1.

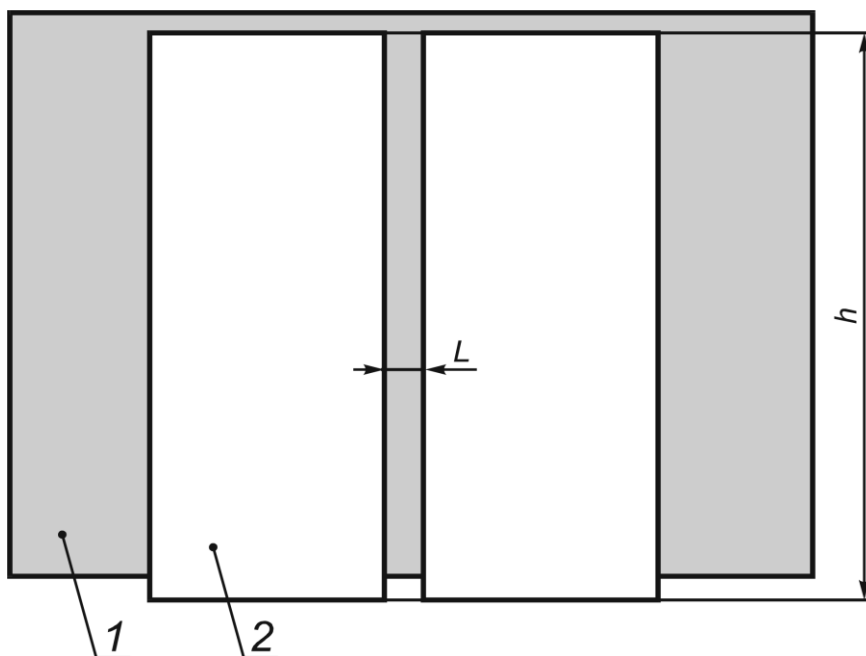
Таблиця 4.1 - Операції та засоби проведення випробувань тепловізорів

Найменування операції	Засоби перевірки та їх метрологічні характеристики
Зовнішній огляд	
Перевірка електричної	Пробійна установка УПУ-14, напругою 500 В, частотою

міцності ізоляції	50 Гц, потужністю 0,25 кВ • А
Перевірка опору ізоляції	Мегомметр М1101М. Клас 2,5
Опробування. Перевірка роботи тепловізора в різних режимах	Еталонний (зразковий) протяжний випромінювач (рис. 4.2) для діапазону температур вище температури навколишнього середовища на 10°C , з випромінювальною здатністю не менше 0,95. Довірча межа похибки випромінювача $1,1^{\circ}\text{C}$ при ймовірності 0,95. Нестабільність підтримання температури не більше $\pm 0,05^{\circ}\text{C/хв}$
Визначення кута поля зору	Еталонний (зразковий) протяжний випромінювач тепловий тест-об'єкт з випромінювальною здатністю не менше 0,95 (рис. 4.2, 4.3); вимірювальна лінійка довжиною 500 мм та ціною розподілу 1 мм; поворотний столик з точністю завдання кута до 1° .
Визначення просторової (кутової) роздільної здатності	Еталонний (зразковий) протяжний випромінювач; тепловий тест-об'єкт з випромінювальною здатністю не менше 0,95, діапазоном змін розміру щілини від 0 до 50 мм, кроком 1 мм. Висота щілини від 140 мм, похибка завдання ширини щілини $\pm 0,1$ мм (рис. 4.2, 4.3).
Перевірка діапазону та визначення основної похибки вимірювання радіаційної температури	Еталонний (зразковий) випромінювач для діапазону температур від мінус 50°C до плюс 80°C . Довірча межа похибки випромінювача $0,6^{\circ}\text{C}$ при ймовірності 0,95. Для діапазону від 0°C до 2500°C довірча межа похибки випромінювача від $0,5$ до $7,5^{\circ}\text{C}$ при ймовірності 0,95
Визначення порога температурної чутливості	Еталонний (зразковий) протяжний випромінювач
Визначення	Еталонний (зразковий) випромінювач

нерівномірності чутливості тепловізора по полю	
Визначення східності показань тепловізора	Еталонний (зразковий) протяжний випромінювач

Усі зазначені у табл. 4.1 засоби проведення випробувань повинні мати свідоцтва про перевірку. Дозволяється застосовувати інші засоби проведення випробувань, що задовольняють по точність вимогам методики проведення випробувань.



1 - протяжний випромінювач; 2 - тепловий тест-об'єкт товщиною 1 мм зі змінною щілиною (висота шторки $h = \text{const}$, відстань між шторками L змінюється від 0 до 50 мм, з кроком 1 мм)

Рисунок 4.2 – Тепловий тест-об'єкт із змінною щілиною

Умови проведення випробувань та підготовка до проведення випробувань. Під час проведення випробувань мають бути дотримані умови згідно з ДСТУ 3974-2000 та вимоги експлуатаційних документів (далі — ЕД) на тепловізор. Засоби перевірки мають бути підготовлені до роботи відповідно до експлуатаційних документів на них.

Вимоги до кваліфікації випробувальників. До випробувань допускають осіб,

атестованих як повірник у галузі пірометрії та радіометрії інфрачервоного випромінювання і вивчили цю методику випробувань.

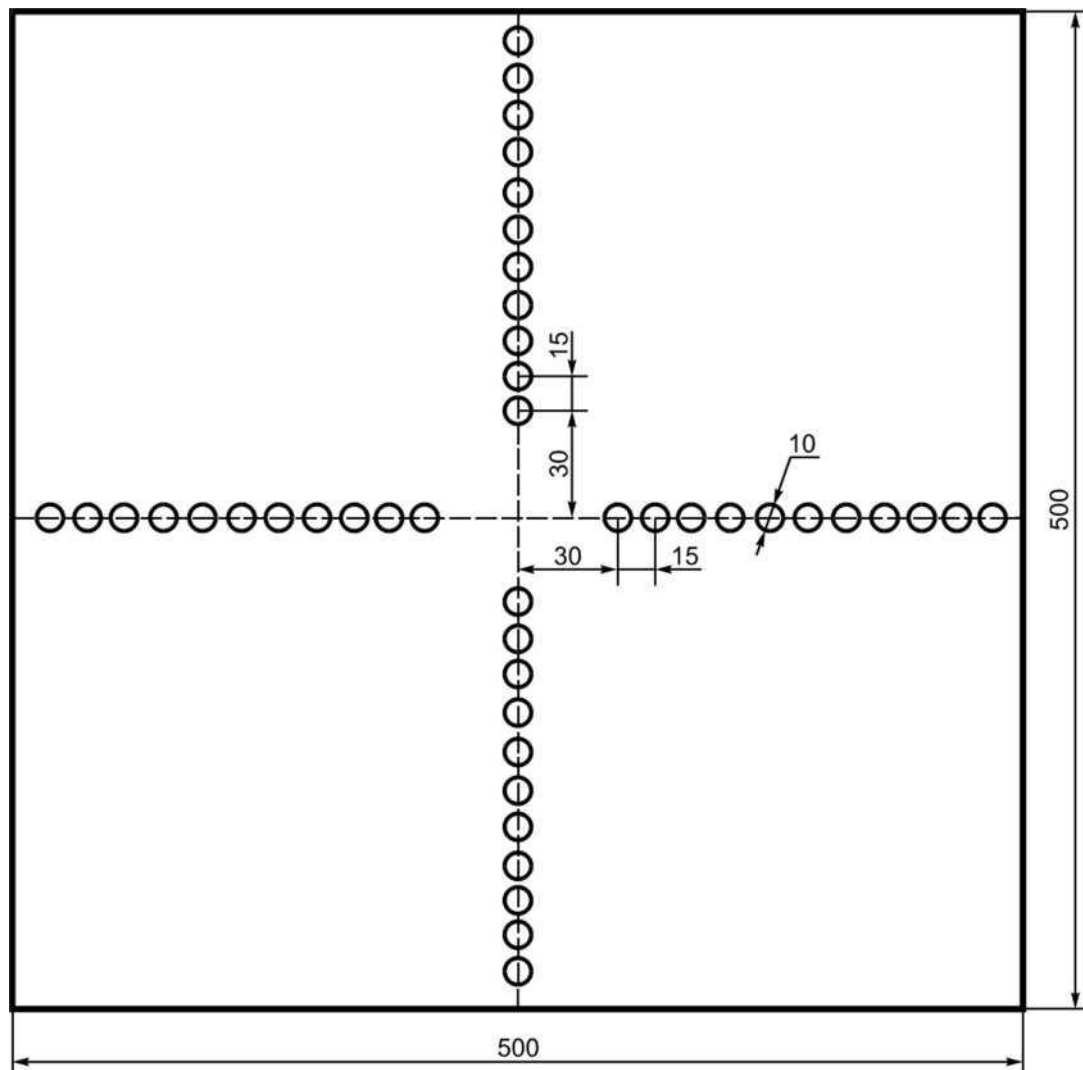


Рисунок 4.3 – Тепловий тест-об'єкт з мітками

Проведення перевірки.

Зовнішній огляд. При зовнішньому огляді має бути встановлене:

- відповідність комплектності та маркування тепловізора ЕД на нього;
- відповідність тепловізора вимогам безпеки, викладеним у паспорті та ЕД на тепловізор;
- відсутність зовнішніх пошкоджень комплекту тепловізора, що випробувається, що впливають на його метрологічні характеристики.

Тепловізор, який не відповідає вимогам, до випробуванням не підлягає.

Випробування електричної міцності ізоляції. Пробійну установку УПУ-14 підключають до закорочених клем живлення та корпусу тепловізора. Ізоляцію

витримують під випробувальною напругою протягом 1 хв, після чого плавно знижують значення напруги до нуля. Перевірку проводять відповідно до експлуатаційної документації на установку або діючим нормативним документам.

Результати випробувань вважають задовільними, якщо не сталося пробою або перекриття ізоляції. Поява коронного розряду не є ознакою незадовільних результатів випробувань.

Перевірка опору ізоляції. Мегомметр М1101М підключають до закорочених клем живлення та корпусу тепловізора. Перевірку проводять відповідно експлуатаційної документації на мегаомметр або діючим нормативним документам. Результати перевірки вважають позитивними, якщо електричний опір ізоляції не менше 20 МОм.

Опробування. Включають тепловізор та перевіряють його працездатність відповідно до ЕД на нього. При виявленні несправності випробування не проводять.

Перевірка роботи тепловізора у різних режимах. Тепловізор та еталонний (зразковий) протяжний випромінювач (далі — протяжний випромінювач) готують до роботи. Тепловізор наводять на випромінювальну поверхню випромінювача. Перевіряють роботу тепловізора у всіх режимах, передбачених ЕД. Якщо хоча б на одному з режимів роботи тепловізора не виконуються функції, зазначені в ЕД або паспорті на нього, випробування не проводять.

Визначення кута поля зору. Вибір робочої відстані. Температурний режим протяжного випромінювача встановлюють вище температури навколишнього середовища на 10 °С. Перед протяжним випромінювачем на відстані від 1 до 3 см розташовують тепловий тест-об'єкт із змінною щільною.

Режим роботи тепловізора повинен забезпечувати максимальну його чутливість. Зображення центру теплового тест-об'єкта поєднують із центральною областю термограми.

У тепловому тест-об'єкті встановлюють максимальну ширину щілини та вимірюють максимальну температуру щілини в термограмі.

Як робочу відстань R , мм, вибирають максимальну відстань між об'єктивом

тепловізора і тепловим тест-об'єктом зі змінною щільною, яка забезпечує максимальне значення температури щілини в термограмі при повному розкритті щілини.

Визначення кута поля зору. Тепловізор встановлюють на поворотному столику, що забезпечує можливість повороту та реєстрації кута повороту столика щодо нерухомої основи у двох площинах так, щоб вісь обертання збігалася з вертикальною площиною, що проходить через передню поверхню вхідного об'єктива тепловізора.

Температурний режим протяжного випромінювача встановлюють вище температури навколишнього середовища на 10 °С. Перед протяжним випромінювачем на відстані від 1 до 3 см розташовують тепловий тест-об'єкт з мітками.

Режим роботи тепловізора повинен забезпечувати максимальну чутливість. Образ центру теплового тест-об'єкта поєднують з центральною областю термограми. Вимірювання проводять на робочій відстані.

На видошукачі (екрані дисплея) тепловізора спостерігають теплове зображення теплового тест-об'єкта. Повертаючи тепловізор за допомогою поворотного столика в горизонтальній площині поєднують вертикальну вісь розташування міток на тепловому тест-об'єкті з лівим і правим краями термограми і реєструють відповідні кути на шкалі столика ϕ_{x1} і ϕ_{x2} град.

Зображення центру теплового тест-об'єкта повертають у центральну область термограми. Повертаючи тепловізор у вертикальній площині поєднують горизонтальну вісь розташування міток на тепловому тест-об'єкті з нижнім і верхнім краями термограми і реєструють відповідні кути на шкалі столика ϕ_{y1} і ϕ_{y2} , град.

Кути поля зору по горизонталі ϕ_x і по вертикалі ϕ_y , град., розраховують відповідно за формулами:

$$\phi_x = |\phi_{x1} - \phi_{x2}|, \quad (4.8)$$

$$\phi_y = |\phi_{y1} - \phi_{y2}|. \quad (4.9)$$

Значення кутів поля зору ϕ_x і ϕ_y повинні відповідати зазначеним у ЕД або

паспорті на тепловізор.

Визначення просторової (кутової) роздільної здатності.

Визначення масштабного коефіцієнта. Температурний режим протяжного випромінювача встановлюють вище температури навколишнього середовища на 10 °С. Перед протяжним випромінювачем на відстані від 1 до 3 см розташовують тепловий тест-об'єкт з мітками.

Режим роботи тепловізора повинен забезпечувати максимальну чутливість. Образ центру теплового тест-об'єкта поєднують з центральною областю термограми. Вимірювання проводять на робочій відстані.

За отриманою термограмою теплового тест-об'єкта з мітками вимірюють відстані між отворами теплового тест-об'єкта в елементах розкладання. Масштабний коефіцієнт до, ел./мм, визначають як відношення відстані між відповідними отворами на термограмі, ел., та тепловому тест-об'єкті, мм.

Визначення просторової (кутової) роздільної здатності по горизонталі. Температурний режим протяжного випромінювача встановлюють вище температури навколишнього середовища на 10 °С. Перед протяжним випромінювачем на відстані від 1 до 3 см встановлюють тепловий тест-об'єкт із змінною щілиною у вертикальному положенні (вісь щілини спрямована вертикально - по висоті термограми).

Режим роботи тепловізора повинен забезпечувати максимальну чутливість. Образ центру теплового тест-об'єкта поєднують з центральною областю термограми. Вимірювання проводять на робочій відстані.

У тепловому тест-об'єкті встановлюють максимальну ширину щілини та вимірюють її. По термограмі визначають максимальну температуру щілини t'_{max} , °С, і середню температуру шторок t'_0 , °С. Реєструють отримані результати вимірів. За результатами вимірювань температур розраховують контраст щілини K_s на термограмах за формулою

$$K_s = \frac{t'_{max} - t'_0}{t_s - t'_0}, \quad (4.10)$$

де t'_{max} - максимальне значення температури щілини, що визначається за

термограмою, °C; t'_0 - середнє значення температури шторок, що визначається за термограмою, °C; t_s — максимальнє значення температури щілини, при максимальному розкритті щілини, що визначається за термограмою, °C.

За зареєстрованими значеннями ширини щілини A , мм розраховують ширину щілини a , ел., приведену до площини зображення (термограми) за формулою

$$a = A_k. \quad (4.11)$$

де A - ширина щілини, мм; k - масштабний коефіцієнт, ел./мм.

Зменшують та реєструють ширину щілини A , мм, та повторюють вимірювання та розрахунки. Виконують операції не менше п'яти разів. За отриманими результатами вимірювань встановлюють залежність контрасту щілини на термограмах K_s від ширини щілини a , ел. — функцію реакції на щілину (FRS):

$$FRS = K_s(a). \quad (4.12)$$

Роздільна здатність по горизонталі F_x , рівна кутовому, або в елементах розкладання - розміру щілини, повинна відповідати значенню, зазначеному в ЕД або паспорті на тепловізор, при обумовленому значенні контрасту щілини.

Визначення дозволу за вертикаллю проводять аналогічно методиці визначення роздільної здатності по горизонталі. Тепловий тест-об'єкт із змінною щілиною встановлюють у горизонтальному положенні (вісь щілини спрямована вздовж рядка термограми), для розрахунку кутового розміру щілини використовують ϕ_y - кут поля зору тепловізора по вертикалі, і Y - кількість елементів розкладання термограми по вертикалі .

Роздільна здатність по вертикалі F_y , рівна кутовому, або в елементах розкладання - розміру щілини, повинна відповідати значенню, зазначеному в ДЕ або паспорті на тепловізор, при обумовленому значенні контрасту щілини

Перевірка діапазону та визначення основної похибки вимірювання радіаційної температури. Вимірювання проводять на відстані між еталонним (зразковим) випромінювачем (далі – еталонний випромінювач) та тепловізором, що забезпечує перекриття апертурою випромінювача не менше 20 % кута поля зору тепловізора. Випромінювальну поверхню еталонного випромінювача поєднують з центральною областю термограми.

Основну похибку тепловізора визначають у п'яти точках діапазону робочих температур тепловізора (нижній, верхній і трьох точках всередині діапазону). Після встановлення стаціонарного режиму еталонного випромінювача на кожній температурі тепловізором не менше п'яти разів вимірюють радіаційну температуру випромінювача. Визначають середнє значення радіаційної температури еталонного випромінювача по термограмі t'_{cp} , °С, з урахуванням його випромінювальної здатності та температури радіаційного фону. Основну похибку Δt , °С для кожної температури тепловізора розраховують за формулою

$$\Delta t = t'_{cp} - t_{cp}, \quad (4.13)$$

де t'_{cp} - середнє значення температури по області, що обмежує зображення апертури випромінювача на термограмі, °С; t – середнє значення температури еталонного (зразкового) випромінювача, °С.

Результати перевірки вважаються позитивними, якщо похибка, розрахована за формулою (4.13), не перевищує значень, наведених в ЕД на тепловізор у всіх точках.

Визначення порога температурної чутливості. Встановлюють температуру протяжного випромінювача 30 °С або іншу, що відповідає паспорту або ЕД, для даної характеристики. Вимірювання проводять на відстані, що забезпечує повне перекриття апертурою протяжного випромінювача кута поля зору тепловізора.

Наводять тепловізор на центральну область апертури випромінювача та фіксують тепловізор у вибраному положенні. Записують у запам'ятовуючий пристрій тепловізора дві термограми через короткий проміжок часу.

Визначають різницю температур Δt_{ij} , °С, для кожного елемента розкладання зареєстрованих термограм за допомогою програмного забезпечення, що додається до тепловізора, або розраховують

$$\Delta t_{ij} = t_{ij}^{(1)} - t_{ij}^{(2)} \quad (4.14)$$

де $t_{ij}^{(1)}$ — температура елемента розкладання першої термограми з координатами $(i;j)$, °С; $t_{ij}^{(2)}$ — температура елемента розкладання другої термограми з координатами $(i;j)$, °С.

Матрицю різниць температур Δt_{ij} представляємо як числового ряду Δt_j . Поріг

температурної чутливості Δt_{nop} , °С, у цьому випадку розраховують за формулою

$$\Delta t_{nop} = 0,707 \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{(\Delta t_j - \Delta \bar{t})^2}{n}}. \quad (4.15)$$

де Δt_j – різниця температур j -го елемента розкладання термограм, °С; $\Delta \bar{t}$ – середня різниця температур, °С; n – кількість елементів розкладання в термограмі.

Значення Δt_{nop} при обумовленій частоті зміни кадрів не повинно перевищувати зазначеного у паспорті або ЕД на тепловізор.

Визначення дійсної кількості елементів розкладання термограми (чутливих елементів).

Встановлюють температуру протяжного випромінювача 30 °С або іншу, що відповідає паспорту або ЕД, для даної характеристики. Вимірювання проводять на відстані, що забезпечує повне перекриття апертурою протяжного випромінювача кута поля зору тепловізора. Наводять тепловізор на центральну область апертури випромінювача та фіксують тепловізор у вибраному положенні. Записують в запам'ятовуючий пристрій тепловізора термограму.

За допомогою програмного забезпечення, що додається до тепловізора, визначають несправні чутливі елементи. Відхилення показань температури кожного чутливого елемента δt_j , °С, від температури протяжного випромінювача t_s , °С, не повинно перевищувати значення порога температурної чутливості Δt_{nop} , °С, більш ніж у шість разів. Чутливий елемент, відхилення показань температури якого відповідає даної вимоги, визнають несправним.

За дійсну кількість елементів розкладання термограми приймається кількість справних чутливих елементів. Дійсна кількість елементів розкладання термограми заносять у протокол проведення випробувань тепловізора.

Визначення нерівномірності чутливості тепловізора по полю. Вимірювання проводять на відстані між еталонним (зразковим) випромінювачем (далі – еталонний випромінювач) та тепловізором, що забезпечує перекриття апертурою випромінювача не менше 20 % кута поля зору тепловізора. Випромінювальну поверхню еталонного випромінювача поєднують з центральною областю

термограми.

Нерівномірність чутливості тепловізора по полю визначають у п'яти точках діапазону робочих температур тепловізора (нижньої, верхньої та трьох точках усередині діапазону). Після встановлення стаціонарного режиму еталонного випромінювача проводять не менше п'яти вимірювань на кожній температурі.

Випромінювальну поверхню еталонного випромінювача послідовно поєднують з не менше ніж п'ятьма різними областями термограми (по центру та в кутах термограми).

Вимірюють середню температуру області термограми, що відповідає апертурі випромінювача. Нерівномірність чутливості тепловізора по полю δt , °С, розраховують за формулою

$$\delta t = t_{max} - t_{min}, \quad (4.16)$$

де t_{max} — максимальне значення з отриманих середніх температур, °С; t_{min} — мінімальне значення отриманих середніх температур, °С.

Значення δt не повинно перевищувати значення, зазначеного у паспорті або ЕД на тепловізор.

Визначення збіжності показань тепловізора. Встановлюють температурний режим протяжного випромінювача вище температури навколишнього середовища на 10 °С. Зображення центру протяжного випромінювача поєднують з центральною областю термограми і протягом 15 хв через кожні 10-15 знімають термограми, якщо в ЕД не вказаний інший мінімальний часовий інтервал.

Визначають середні арифметичні значення температури за наслідками вимірювань протягом трьох інтервалів по 5 хв. Різниця максимальних та мінімальних середніх арифметичних значень температури не повинна перевищувати значення збіжності температури, вказаної у ЕД чи паспорті на тепловізор.

Оформлення результатів випробувань. При позитивних результатах перевірки на тепловізор видають свідоцтво. При негативних результатах випробувань на тепловізор видають повідомлення про непридатність із зазначенням причин. Результати випробувань тепловізора заносять у протокол.

Висновки до розділу

На основі приведенного матеріалу розділу можна зробити такі висновки:

- а) здійснений аналіз похибок тепловізора;
- б) розраховано сумарну похибку контролю тепловізором;
- в) запропоновано конструкцію і вигляд тест-зразків для проведення випробувань тепловізора;
- г) запропоновано методику випробувань тепловізора.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі було зроблено аналіз використання тепловізійних засобів для пошуку і локалізації витоків теплоносіїв. Вказано переваги застосування тепловізійних засобів контролю наявності витоків теплоносіїв. Проведено дослідження теоретичних основ тепловізійних вимірювань, було визначено основні сфери застосування тепловізорів, проаналізовано принципи роботи основних типів тепловізорів та особливості їх конструкції, визначено основні аналоги запропонованого приладу та їх основні характеристики. В роботі розроблено функціональну схему пристрою, яка була використана для вибору компонентів і вузлів тепловізора. Також було синтезовано оптичну систему в програмному середовищі Zemax, що дозволило максимально оптимізувати систему лінз для пристрою. За результатами моделювання було створено оптичну схему тепловізора. Запропоновано елементи для побудови тепловізора. В роботі здійснений аналіз похибок тепловізора, розраховано сумарну похибку контролю тепловізором, запропоновано конструкцію і вигляд тест-зразків для проведення випробувань тепловізора, запропоновано методику випробувань тепловізора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Озогович А. Панчук О. Методи і засоби вимірювання розподілу температури / Вимірювальна техніка та метрологія. – 2017. – Том 78. – с. 34-41.
2. Неня О.В. Сучасні тепловізори для спеціального та повсякденного застосування / Сучасна спеціальна техніка. – 2016. – № 4. – с. 108-120.
3. Ковчавцев А.П. Тепловизор: лучше один раз увидеть. НАУКА из первых рук. – 5 (47). – 2012. – с.34 – 43.
4. Назаренко Л.А. Фізичні основи джерел світла: навч. Посіб. – Харків: ХНАМГ, 2009. – 206 с.
5. Вознюк С. І. Сфери використання, переваги та види тепловізорів / Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 13-15 березня 2019 р. – Електрон – 2019.
6. Кононюк А.Е. Основы фундаментальной теория искусственного интеллекта. – В 20-и кн. Кн.3, ч.4. – К.: Освіта України. 2017. – 480 с.
7. Гусев Г.Г. О выборе оборудования для бесконтактного измерения температуры / В мире неразрушающего контроля, 2003. – №2. – С. 19-21.
8. Бажанов С.А. Тепловизионный контроль электрооборудования в эксплуатации (Часть 1) – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2005. – Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». Вып. 5 (77) – 80 с.
9. Бажанов С.А. Тепловизионный контроль электрооборудования в эксплуатации (Часть 1) – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2005. – Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». Вып. 5 (77) – 80 с.
10. Муравьев А. В. Пассивная термостабилизация оптической системы тепловизора и перспективы его применения в медицинской диагностике / Приборостроение – 2017: материалы 10-й Международной научнотехнической конференции. – Минск, Белоруссия, 2017. – С. 385-387.
11. Тымкул, О. В., Тымкул Л. В., Тымкул В. М. Аналитическая модель температурно-частотной характеристики тепловизоров / Оптический журнал. –

2002. – Т. 69. – № 10. – С. 73 – 75.

12. Волков В.Г., Ковалев А. В., Федчишин В. Г. Тепловизионные приборы нового поколения/Специальная техника.-2004, - №6.

13. Муравйов О. В., Назарчук О. О. Компенсація терморозфокусування оптичної системи тепловізора та перспективи його використання в медичній діагностиці / Вісник інженерної академії України. – 2017. – вип. №1. – С. 124-131.

14. Криксунов Л.З. Тепловизоры / Киев.: Техника, 1987. – 287 с. 70

15. Тягур В. М., Муравьёв А. В., Кучеренко О. К. Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового ахромата / Оптический журнал. – 2014. – том 81. – вып. №4. – С. 42-47.

16. Муравьёв А. В., Назарчук Е. А. Термостабилизация качества изображения оптической системы термографа / Вісник інженерної академії України. – 2016. – вип. №4. – С. 195-199.

17. Муравьёв А. В. Пассивная атермализация оптической системы медицинского термографа / TRENDS OF MODERN SCIENCE. – vol. 15. – 2018. – pp. 88-91.

18. Кучеренко О. К., Муравйов О. В., Тягур В. М. Ахроматизація та атермалізація об'єктивів інфрачервоної техніки / Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2012. – вип. №5. – С. 114-117.

19. Галаган Р. М., Муравьёв А. В., Томашук А. С. Модель восстановления серии изображений из смазанного изображения для решения задачи высокоточного измерения диаметра и температуры излучающих объектов / Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій (матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції), 2019. – С. 169-171.

20. Муравьёв А. В., Кучеренко О. К. Композиции атермализованных трехкомпонентных инфракрасных объективов / Наука и техника. – 2015. – № 4. – С. 32–37.

21. Tyagur V. M., Kucherenko O. K., Murav'ev A. V. Passive optical athermalization of an IR three-lens achromat / Journal of Optical Technology. – vol. 81 (4). – 2014. – pp. 199-203.

22. Муравьев А. В. Основные тенденции, проблемы и перспективы развития дисплейной наноэлектроники / Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському союзі: 71 матеріали 2-гої науково-технічної конференції з міжнародною участю. – Польща, Люблін, 2018. – С. 10-11.

23. Кучеренко О. К., Муравйов О. В., Остапенко Д. О. Вплив температури на абераційні властивості ІЧ об'єктивів / Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. – № 1. – С. 99-105.

24. Сторожик Д. В., Муравйов О. В., Протасов А. Г., Баженов В. Г., Богдан Г. А. Комплексування мультиспектральних зображень, як метод підвищення їх інформативності при бінарній сегментації / Наукові вісті КПІ. – 2020. – № 2. – С. 82-87.

25. Кучеренко О. К., Муравйов О. В., Остапенко Д. О. Вплив температури на абераційні властивості об'єктивів / Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. – № 1. – С. 99-105.

26. Protasov A. Reconstruction of the thermal field image from measurements in separate points / 5th IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, MRRS 2017; National Aviation University (NAU) Kyiv; Ukraine. – 2017. – С. 89-92.

27. Кучеренко О. К., А. В. Муравьев Методы пассивной атермализации и ахроматизации двухкомпонентных оптических систем / Вісник НТУУ «КПІ», серія Приладобудування. – 2012. – вип. № 43. – С. 46–53.

28. Назарчук О. О., Муравйов О. В. Компенсація терморозфокусування оптичної системи термографа / Біомедична інженерія. – 2017. – №5. – С. 66–67.

29. Муравйов О. В., Петрик В. Ф., Лисенко Ю. Ю., Богдан Г. А., Наконечна А. В. Автоматизація методу термографічної діагностики патологій організму людини / Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. – 2022. – №1. – С. 47-53.

30. Живкович А. В. Современные технологии бесконтактного измерения температуры / А. В. Живкович, А. В. Муравьев // Материалы XVI Международной научно-практической конференции «Динамика научных исследований – 2020», 07-15 июля 2020, Пшемысль, Польша. – Przemysł : Nauka i studia, 2020. – Vol. 7. – С.

110-115.

31. Petryk V. F., Protasov A. G., Galagan R. M., Muraviov A. V., Lysenko I. I. Smartphone Based Automated Non-Destructive Testing Devices / Devices and Methods of Measurements. – 2020. – 11(4), PP. 272-278. Doi:10.21122/2220-9506-2020-11-4-272-278

32. Галаган Р. М., Момот А. С., Протасов А. Г. Тестування нейромережових модулів системи теплової дефектометрії за допомогою імітаційного моделювання / Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2022. – №6. – С. 49–55.

33. Momot A., Galagan R., Gluhovskii V. Deep Learning Automated System for Thermal Defectometry of Multilayer Materials / Devices and Methods of Measurements. – 2021. – №12. – pp. 98–107.

34. Momot A., Skladchikov I. The use of EfficientNet models in infrared image classification / XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 17-18 травня 2022 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна : збірник матеріалів конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – С. 204-207.

35. Галаган Р. М., Момот А. С. Statistical analysis of thermal nondestructive testing data / Сучасні інформаційні системи. – Харків. – 2019. – Том. 3, № 1. – С. 58-63.

36. Momot A., Skladchikov I. Deep learning automated data analysis of security infrared cameras / Slovak international scientific journal. – 2021. – №52. – pp. 13–16.

37. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювання: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Івано Франківськ: Видавництво “Факел”, 2002. – 400 с.

38. ДСТУ 3974-2000. URL: https://www.dnu.dp.ua/docs/ndc/standarts/DSTU_3974-2000.pdf (звернення: 27.11.2023 р.)

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи: Дослідження тепловізійних методів і засобів контролю тепловтрат в системах теплопостачання.

Обсяг ПЗ в аркушах: 61.

Перелік креслень графічної частини:

1. Основи теплового контролю.
2. Оптична схема системи.
3. Моделювання оптичної системи тепловізора.
4. Функціональна схема тепловізора.
5. Метрологічний аналіз.
6. Метрологічне забезпечення тепловізора.

Дата закінчення виконання роботи: 12.12.2023 р.

Підпис: