МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Розробка тепловізійної системи з приймачем,
що охолоджується»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-63
Бондар П. С.
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма: Прикладна фізика
енергетичних систем
Керівник: д.ф.-м.н., Кокодій М.Г.

Рецензент:

Харків – 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра інформаційних технологій у фізико-енергетичних системах
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) бакалавр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Руслан СУХОВ
підпис
"____"_____2021 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Бондар Павло Сергійович

1.Тема роботи «Розробка тепловізійної системи з приймачем,
що охолоджується»
керівник роботи: Кокодій Микола Григорович, доктор фізико-математичних наук, професор.
затверджені наказом по університету від "___"_____ 20 року № _____

2. Строк подання студентом роботи

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

1) розробити блок-схему тепловізійної системи зі скануванням на основі приймача, що охолоджується;
2) розробити схему системи сканування та отримати досвід по процесам її виготовлення;
3) написати фрагмент тексту програми для реалізації однієї з функцій обробки зображення;

4) отримати досвід керування тепловізійною системою та кількісної обробки термограм.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми, узгодження, а також затвердження її на кафедрі
2	Робота над літературою та іншими джерелами
3	Затвердження теми на кафедрі
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання дипломної роботи(висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5.Дата видачі завдання _____

Студент _____ Павло БОНДАР
підпис

Керівник роботи _____ Микола КОКОДІЙ
підпис

РЕФЕРАТ

Бондар П.С. «Розробка тепловізійної системи з приймачем, що охолоджується» Кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2021. – 68 с.

Магістерська робота виконана студентом Бондарем Павлом Сергійовичем на тему: «Розробка тепловізійної системи з приймачем, що охолоджується».

Розроблено оригінальну тепловізійну систему зі скануванням та приймачем, що охолоджується до температур рідкого азоту. Система призначена для вирішування різноманітних задач наукових досліджень. Основна ідея розробки – модульна конструкція апаратної та програмної частини системи, що надає можливість достатньо легко змінювати параметри приладу та функції програмного забезпечення відповідно до конкретної мети дослідження. В процесі роботи було визначено вимоги до тепловізійної системи та розроблено її функціональну схему. Також було розроблено конструкцію системи сканування та написано модуль програми, що здійснює цифрову фільтрацію теплового зображення.

Дипломний проект містить 68 сторінки, 21 рисунка, 36 джерел, 4 таблиці та 2 додатка.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТЕПЛОВІЗОР, СКАНУВАННЯ, ІНФРАЧЕРВОНИЙ ДЕТЕКТОР, НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ.

РЕФЕРАТ

Бондарь Павел «Разработка тепловизионной системы с охлаждаемым приемником» Квалификационная работа магистра прикладной физики. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2021. – 68 с.

Магистерская работа выполнена студентом Бондарем Павлом Сергеевичем на тему: «Разработка тепловизионной системы с охлаждаемым приемником».

Разработана оригинальная тепловизионная система со сканированием и приемником, охлаждаемая до температур жидкого азота. Система предназначена для решения различных задач научных исследований. Основная идея разработки – модульная конструкция аппаратной и программной части системы, позволяющая достаточно легко изменять параметры прибора и функции программного обеспечения в соответствии с конкретной целью исследования. В процессе работы были определены требования к тепловизионной системе и разработана ее функциональная схема. Также была разработана конструкция системы сканирования и написан модуль программы для реализации цифровой фильтрации теплового изображения.

Дипломный проект содержит 68 страницы, 21 рисунок, 36 источника, 4 таблицы и 2 приложения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТЕПЛОВИЗОР, СКАНИРОВАНИЕ, ИНФРАКРАСНЫЙ ДЕТЕКТОР, НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

ABSTRACT

Pavlo Bondar “Development of thermal imaging system with a cooled detector.” Qualification work of the master of applied physics. – Kharkiv. – V.N. Karazin KhNU, 2021. – 68 p.

The master’s work was done by student Bondar Pavlo on the topic: " Development of thermal imaging system with a cooled detector".

The original thermal imaging system with scanning and a detector, cooled to liquid nitrogen temperatures, has been developed. The system is designed to solve various problems of scientific research. The main idea of the development is a modular design of the hardware and software part of the system, which makes it quite easy to change the parameters of the device and the functions of the software in accordance with the specific purpose of the study. In the process of work, the requirements for the thermal imaging system were determined and its functional diagram was developed. Also, the design of the scanning system was developed and a program module for digital filtering of a thermal image was created.

The graduation project contains 68 pages, 21 illustrations, 36 references, 1 table and 2 appendices.

KEYWORDS: THERMAL IMAGER, SCANNING, INFRARED DETECTOR, SCIENTIFIC RESEARCH.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів…...8

Вступ……..9

1. Тепловізійні системи……..12

1.1. Типи тепловізорів…….....12

1.2. Тепловізори зі скануванням.……13

1.3. Постановка задачі…….....16

2. Розробка системи зі скануванням та приймачем, що охолоджується.…..17

2.1. Вимоги до та її функціональна схема…….17

2.2. Фотоприймальний пристрій……..……...20

2.3. Оптико-механічний блок…….……..……...24

2.4. Електронний блок…….…….....30

2.5. Корпус та елементи кріплення…….……...35

2.6. Виготовлення окремих блоків та збірка АТП……..…….....36

3. Створення програмного забезпечення…….....43

Висновки……...……..47

Список використаних джерел...……....49

Додаток А Фрагмент тексту програми.……...52

Додаток Б Приклад адаптації АТП під задачі кріобіології...……..64

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АТП – аналізатор теплових полів

ІЧ – інфрачервоний

ПК – персональний комп’ютер

КПК – кишеньковий персональний комп’ютер

SD - (Secure Digital) картка – картка для запису інформації

DSP - (Digital Signal Processor), ЦСП - цифровий сигнальний процесор

ФПП – фотоприймальний пристрій

АЧТ – модель абсолютно чорного тіла

USB (Universal Serial Bus) – універсальна послідовна шина

РКЕ - рідкокристалічний екран

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ОЗП - оперативний запам'ятовуючий пристрій

ПЗП – постійно запам’ятовуючий пристрій

КРТ (CdHgTe) – кадмій-ртуть-теллур фотоприймач

ВТНП – високотемпературний надпровідник

DELPHI – мова програмування

PPL (Pocket Programming Language) - мова програмування

NEP - (Noise Equivalent Power) - параметр детектора

ВСТУП

Відомо, що будь-який фізичний, хімічний, механічний або біологічний процес супроводжується виділенням або поглинанням тепла, а спектральний та просторовий розподіл інтенсивності такого теплового випромінювання містить багато важливої інформації про цей процес. Для отримання цієї інформації використовують тепловізійні системи, які являють собою оптико-електронні прилади для візуалізації температурного поля та вимірювання температури. Ще у 1950-ті роки вчені зафіксували на плівці перше термографічне зображення у вигляді тепловізійного знімка (термограми). В останнє десятиліття спостерігається значний підйом у використанні тепловізійних методів у різних галузях людської діяльності. Він обумовлений вдосконаленням технології виробництва інфрачервоних (ІЧ) приймачів і розвитком комп'ютерних технологій. Лідируючі позиції у світі з розробки та продажу комерційних тепловізійних систем займають закордонні фірми NEC (США/Японія), FLUKE (США), FLIR (Швеція), Testo (США/Німеччина) [1-4]. Але сучасні серійні тепловізори, маючи високі технічні характеристики, як правило, працюють тільки в спектральних діапазонах 3-5 або 8-14 мкм (вікна прозорості атмосфери). Цих діапазонів достатньо для звичайних застосувань тепловізорів в різних сферах людської діяльності (промисловості, енергетиці, будівництві, сільському господарстві). Але для вирішення деяких нетипових задач (наприклад, дуже високо- або низькотемпературні процеси, явища, що супроводжують нетеплове випромінювання та ін.) характеристик серійних тепловізорів недостатньо. Такі задачі, як правило, виникають при наукових лабораторних дослідженнях [5]. Крім зміни параметрів приладу: розширення спектрального діапазону, збільшення чутливості, зміни діапазону вимірюваних температур та ін., - часто виникає потреба введення додаткових функцій в програмне забезпечення тепловізійної системи або інтеграція її в єдину систему з іншим експериментальним або медичним обладнанням зі створенням спільного інтерфейсу. Це неможливо при використанні серійних тепловізорів, у яких апаратна і програмна частини недоступні для змін та модернізації. Тому

при вирішення деяких задач великий інтерес викликають, в тому числі і за кордоном, спеціалізовані тепловізори або системи з «відкритою архітектурою» [6].

Рівень вітчизняних розробок тепловізорів, здатних стати основою для побудови систем, які можуть бути гнучко трансформовані під специфіку конкретної задачі діагностики, в основному, обмежений одиничними приладами (розробки Фізико-технічного інституту низьких температур (ФТІНТ) НАН України [7-9]), або одиничними приладами на базі охолоджуваних лінійок та матриць малого формату (розробки Інститутом напівпровідників НАН України спільно з Інститутом мікроприладу НАН України та ФТІНТ НАН України. [10].

Метою дипломної роботи є розробка програмно-апаратного комплексу (аналізатору теплових полів – АТП) на базі охолоджуваного приймача. Завдання даної роботи: (1) розробити блок-схему тепловізійної системи; (2) розробити схему системи сканування та отримати досвід по процесам її виготовлення; (3) написати модуль програми, що здійснює одну з функцій обробки теплового зображення; (4) отримати досвід керування тепловізійною системою та кількісної обробки термограм.

АТП є універсальним приладом, здатним вирішувати як усі стандартні, так і різнопланові нетипові (наукові або медичні) задачі тепловізійного аналізу. Актуальність та важливість розробки такого приладу полягає в необхідності отримання важливої наукової або медичної інформації, що міститься у теплових полях усіх об’єктів, що досліджуються. Поставлена мета досягнута завдяки основній ідеї розробки – модульній конструкції апаратної та програмної частини АТП, що надає можливість достатньо легко змінювати конструкцію та параметри приладу або функції програмного забезпечення відповідно до конкретної мети дослідження. Практична значимість розробки полягає у тому, що АТП може бути використаний для вирішування як будь-яких стандартних, так і спеціальних задачі тепловізійного аналізу.

Таким чином, об’єктом досліджень дипломній роботі є тепловізори, а предметом, - конкретна оригінальна тепловізійна система зі скануванням та приймачем, що охолоджується, яка має блочну структуру апаратної та програмної частини і може бути адаптована для вирішення поточної наукової задачі.

Ця дипломна робота є, певною мірою, продовженням курсової роботи бакалавра, в якій автором було розроблено один з блоків АТП – фотоприймальний пристрій [11].

Диплом складається з наступних розділів: (i) вступ, де обґрунтовується необхідність розробки спеціальних тепловізійниїх систем для використання тепловізійного методу у наукових дослідженнях, (ii) основна частина, де проведено аналіз існуючих типів тепловізорів, в результаті чого обрано шлях рішення поставленого завдання дипломної роботи (розділ 1), де описано процес розробки конструкції всієї системи та окремих її блоків та процес виготовлення окремих блоків (розділ 2), процес створення програмного забезпечення (розділ 3), та (iii) висновки, де перелічені отримані в процесі роботи результати, а також вклад у ці результати автора диплома і практичний і науковий досвід, який він отримав в процесі роботи, (iv) список використаних джерел та (v) 2 додатка, де приведено фрагмент програми, у тому числі модуль, що був написаний автором (Додаток А), та приклад адаптації розробленої тепловізійної системи до досліджень динаміки низькотемпературних теплових полів (Додаток Б).

1. ТЕПЛОВІЗІЙНІ СИСТЕМИ

Основним завданням даної дипломної роботи було розробити тепловізійну систему для наукових досліджень, здатну вирішувати нестандартні задачі тепловізійного аналізу. Тому, насамперед, було проведено ознайомлення з літературою по даній темі.

1.1.Типи тепловізорів

Згідно [12], тепловізор це оптико-електронний прилад, призначений для безконтактного (дистанційного) спостереження, вимірювання та реєстрації просторового/просторово-часового розподілу радіаційної температури об'єктів, що знаходяться в полі зору приладу, шляхом формування тимчасової послідовності термограм та визначення температури поверхні об'єкта за відомими коефіцієнтами випромінювання та параметрами зйомки (температура довкілля, пропускання атмосфери, дистанція спостереження тощо. Відповідно до формату інфрачервоного (ІЧ) детектора (кількості чутливих елементів) та його робочої температурі [13], тепловізори підрозділяються на основні типи (рисунок 1.1), [14-16]

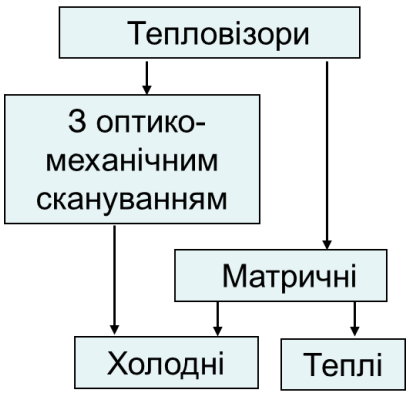


Рисунок 1.1. Основні види тепловізорів

На сьогоднішній день найбільше поширеними є матричні тепловізори без сканування на основі детектора випромінювання, який не охолоджується (матриці мікроболометричних приймачів: FPA - focal play array) [8, 17, 18].

Ці тепловізори компактні, легкі в управлінні і використовуються практично у всіх сферах людської діяльності для вирішування багатьох задач тепловізійного аналізу [19-22]. Функціональна схема такого приладу приведено на рисунку 1.2. Тепловізори на основі охолоджуваних до азотних температур фоточутливих матриць (HgCdTe, InSb) - найдорожчі (вартість технології виготовлення) та масивні (система охолодження), але разом з тим мають високу швидкодію, дальність вимірювань, а також температурну чутливість (до 0,018 °С), недосяжну для неохолоджуваних матриць [13]. Враховуючи названі недоліки і переваги матриць, що охолоджуються, тепловізори на їх основі не дуже поширені і застосовуються, в основному, для вирішення вузькоспеціальних завдань.

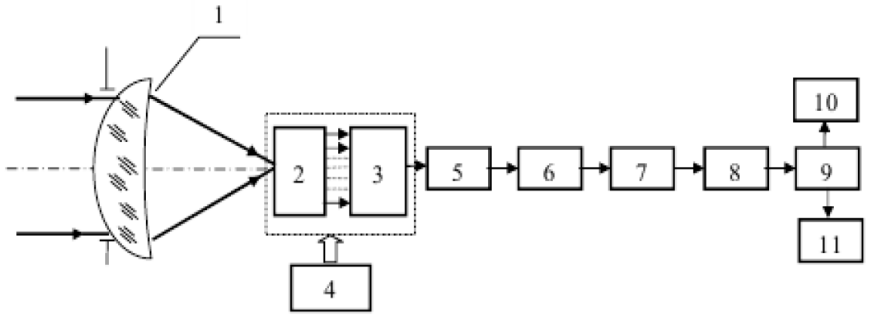


Рисунок 1.2. Загальна функціональна схема тепловізора з матричним (FPA) детектором: 1 – оптична система, 2 - FPA з попереднім підсилювачем, 3 – мультіпоексор, 4 - система охолодження, 5 – коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів, 6 – АЦП, 7 – цифровий коректор неоднорідності, 8 – коректор непрацюючих елементів, 9 – формувач зображення, 10 – дисплей, 11 – цифровий вихід.

1.2. Тепловізори зі скануванням.

Тепловізори зі скануванням на основі охолоджуваного одноелементного або малоформатного детектора також мають високі параметри (крім швидкодії) і також застосовуються для вузького кола спеціальних завдань, для яких важливі унікальні характеристики, але вони значно дешевше і мають простішу технологію виготовлення детектора. Тому, не маючи відповідних

технологічних можливостей, ми обрали розробку приладу на основі одноелементного детектора з механічним скануванням.

На рисунку 1.3 представлена узагальнена функціональна схема тепловизору з механічним скануванням [23].

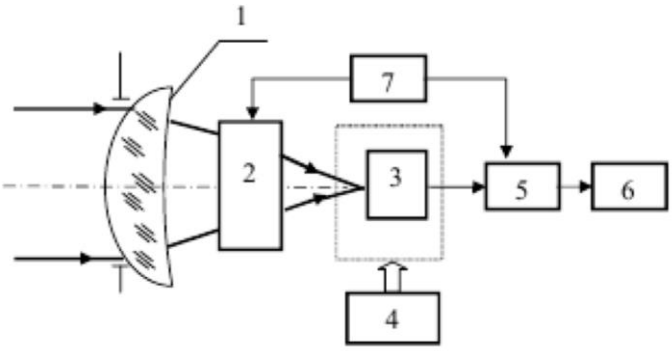


Рисунок 1.3. Загальна функціональна схема тепловизору зі скануванням: 1 – оптична система, 2 – блок оптико-механічного сканування, 3 – детектор, 4 – система охолодження, 5 електронний тракт, 6 – прилад відео контролю, 7 – система синхронізації.

Існує безліч схем скануючих тепловізорів [13-15, 23-26]. Вони розділяються по типу сканування (одноелементне паралельне та послідовне) відповідно до формату детектору (одноелементний, лінійка або малоформатна матриця), по траєкторіях сканування, закону сканування та ряду інших ознак. Рисунок 1.4 ілюструє вибір методу сканування відповідно до формату детектора.

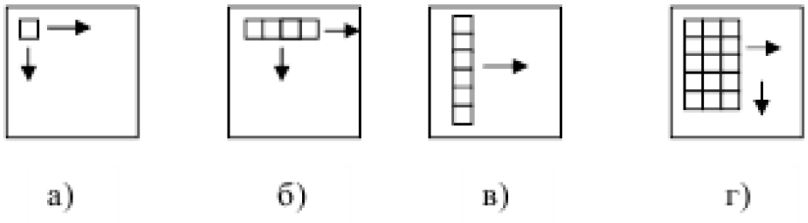


Рисунок 1.4. Методи сканування: а) послідовне сканування при одноелементному детекторі, б) послідовне сканування при лінійці чутливих елементів, в) паралельне сканування (відразу формується кадр) при лінійці з

числом елементів, достатнім для формування растру, г) паралельно-послідовне сканування при малоформатній матриці.

На рисунку 1.5 представлена загальна схема приладу з послідовним скануванням (одноелементний детектор). Саме таку схему було обрано при розробці аналізатора теплових полів (АТП).

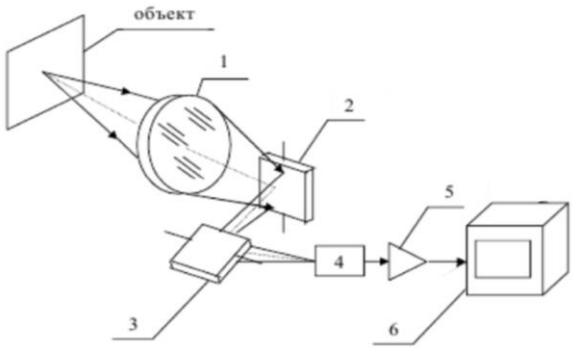


Рисунок 1.5. Функціональна схема тепловізору з послідовним скануванням: 1 – об'єктив, 2 і 3 – скануючи дзеркала, 4 – детектор, 5 – електронний тракт, 6 – відеоконтрольний пристрій.

В процесі вивчення літератури по даній темі автор ознайомився з функціональними схемами багатьох відомих тепловізійних моделей зі скануванням, деякі вже застаріли і зняті з виробництва. Це шведські тепловізори AGEMA-661, російські тепловізори «Рубін» [23], «Радуга», «ТВ-03» [26] та інші.

Типовим прикладом тепловізору зі скануванням, який на сьогодні успішно використовується, є російський тепловізор «IPTIC-2200» [27]. Він розроблений у двох варіантах - на одноелементному детекторі з антимоніду індію (InSb), та вузькозонному напівпровіднику (HgCdTe), які охолоджуються до температур рідкого азоту. Тепловізор працює у спектральних діапазонах (3 – 5) та (8-14 мкм відповідно обраному детектору, мкм, має час кадру 1.5 сек, поле зору (25V x 20 H) градусів та температурну чутливість на рівні (0.05-0.1) ^{o}C.

1.3. Постановка задачі

В результаті вивчення літератури, технічної документації й інших матеріалів по темі диплому було проведено аналіз способів розв'язання поставленого завдання, а саме - розробити тепловізійну систему для наукових досліджень, здатну вирішувати нестандартні задачі тепловізійного аналізу.

Основною привабливістю системи, що розроблюється має бути можливість змінювати її конструкцію, параметри та функції програмного забезпечення відповідно до наукової задачі тепловізійного аналізу. Тому було обрано блочну конструкцію тепловізійної системи з оптико механічним скануванням, на базі детекторів, які охолоджуються. Такий вибір надає можливість:

1. Використовувати різноманітні ІЧ детектори азотного рівня охолодження (одноелементних або малоформатних лінійок та матриць з InSb, HgCdTe, ВТНП (високотемпературних надпровідникових) болометрів тощо), для чого система охолодження (кріостат) має бути розбірною.
2. Використовувати різноманітні об’єктиви, у тому числі лінзові (для фоточутливих детекторів) та дзеркальні (для неселективних детекторів, наприклад, ВТНП).
3. Використовувати різні закони сканування (відповідно від типу детектору).
4. Замінювати відповідно задачі окремі блоки конструкції.
5. Замінювати або додавати відповідно задачі окремі блоки у програмне забезпечення тощо.

Таким чином, система, що розробляється, повинна мати блочну конструкцію апаратної і програмної частин, розбірний кріостат та відповідні елементи кріплення, які дозволятимуть її швидко адаптувати під нову задачу тепловізійного аналізу.

2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЗІ СКАНУВАННЯ НА ОСНОВІ ПРИЙМАЧА, ЩО ОХОЛОДЖУЄТЬСЯ

2.1 Вимоги до аналізатора теплових полів (АТП) та його функціональна схема

При розробці АТП було сформульовано технічні та конструктивні вимоги до нього:

1. АТП представляє собою тепловізор з системою сканування та охолоджуваним до температури рідкого азоту малоформатним (від 1 до 8 чутливих елементів) приймачем [14,28];
2. АТП має бути розбірним з замінними вузлами;
3. вузли, що розроблюються, а саме: фотоприймальний пристрій, система сканування, оптична система, модулятор, система фокусування, електронний блок та інші вузли, - мають забезпечити безвідмовну роботу АТП, отримання теплового зображення об'єкта на моніторі та вимірювання абсолютної температури;
4. система охолодження приймачів має представляти собою портативний розбірний оптичний кріостат [29], який повинний охолоджувати до азотної температури протягом не менше 5 годин від 1 до 8 чутливих елементів. Кріостат повинен мати легкий доступ для заміни приймача. Вхідне вікно кріостату має бути змінним;
5. система сканування має забезпечити формат кадру зображення не менш ніж 256 х 256 елементів зображення. Час формування кадру при використанні 1 чутливого елемента – не більш 1 секунди;
6. об'єктиви (два взаємозамінних об'єктива – лінзовий об'єктив для роботи у спектральному діапазоні (2÷18) мкм, та дзеркальний об'єктив Кассегрена для роботи у діапазоні (1-100) мкм) повинні забезпечити формування зображення у площині фотоприймача у заданому спектральному діапазоні з мінімальними аберраціями;

7. система кріплення кріостата має бути універсальною і передбачити заміну кріостата на комерційні фотоприймальні пристрої азотного та гелієвого рівня охолодження, наприклад, фірм “Judson Technologies” та “Oxford Instruments” (США) [30, 31];
8. в електронному блоці має бути передбачено 8 незалежних каналів обробки відеосигналу для використання до 8-ми чутливих елементів одночасно та можливість зміни закону сканування при використанні смужки 8-ми фотоприймачів;
9. основні характеристики, що очікуються для АТП будуть залежати від приймача, що використовується.. Для одноелементного CdHgTe (КРТ) фоторезистора азотного рівня охолодження [28] характеристики мають бути не гірше, ніж :
    - спектральний діапазон ……..…… (8-14) мкм
    - поле зору, не нижче...…….…….....25 х 25 град;
    - кутова роздільна здатність, не гірше…….....…1,5 mrad;
    - температурна чутливість на рівні 30^{o}C, не гірше.…….... 0,1^{0}C;
    - час кадру, не більше……..1.5 сек;
    - діапазон вимірювальних температур, не нижче..... -20...+200С ;
    - точність вимірювання температури, не гірше…….…… 2%
10. конструктивно АТП має бути виконаний у вигляді легкого (не більше 1,8 кг) та зручного в експлуатації переносного приладу. АТП має бути розроблений у 2-х варіантах:
    - стаціонарний варіант (з зовнішнім ПК),
    - мобільний варіант (з вбудованим КПК);
11. АТП повинен мати мережне та автономне живлення;
12. електронний блок та оригінальне програмне забезпечення АТП повинні забезпечувати найсучасніші функціональні можливості, а саме:
    - візуалізація термограм у реальному часі;

- проведення експрес аналізу стану об'єктів контролю по їх тепловому зображенню;
- вимірювання абсолютної температури в будь якій точці або області;
- можливість запису та зберігання окремих термограм або динамічного термографічного фільму;
- можливість вибору різних палітр;
- автоматичне встановлення динамічного діапазону;
- проведення термопрофілів, тощо (всього понад 20 функціональних можливостей).

Враховуючи приведені вище конструктивні та технічні вимоги, було розроблено функціональну схему АТП, яка приведена на рисунку 2.1.

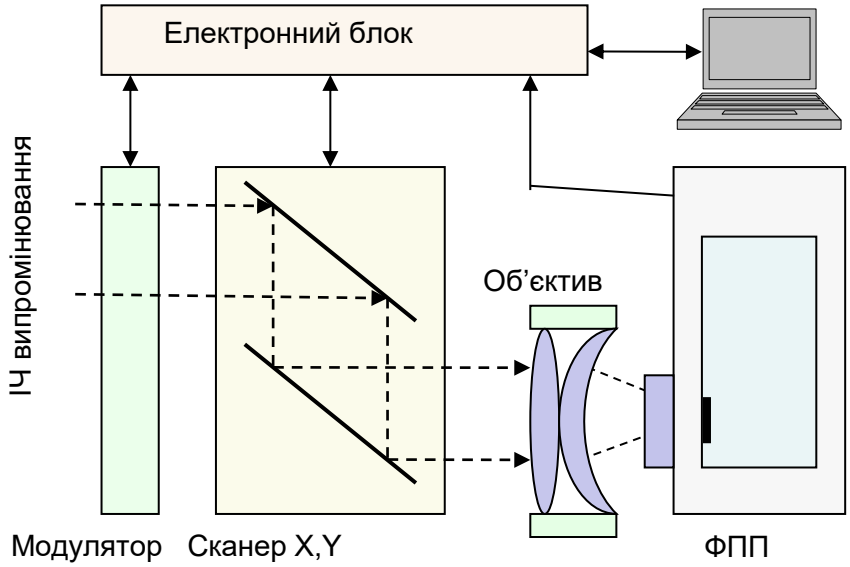


Рисунок 2.1. Функціональна схема АТП

АТП представляє собою перетворювач ІЧ зображення з оптико-механічним скануванням і складається з трьох основних модулів:

1. фотоприймальний пристрій (ФПП), що включає: приймач (чутливий елемент), систему його охолодження, попередній підсилювач;

2. оптико-механічний блок, до складу якого входить: модулятор, система сканування, об'єктив;
3. електронний блок, до складу якого входить: контролер сканера, процесор обробки відеосигналу, інтерфейсний контролер.

Випромінювання від досліджуваного об'єкта, потрапляючи через фокусуючи дзеркала або лінзи на детектор, генерує електричний сигнал. Так як механічний сканер здійснює переміщення миттєвого поля зору детектора по досліджуваному об'єкту, то просторовий розподіл теплового поля об'єкта перетворюється в послідовність електричних сигналів, подальшу цифрову обробку яких, а також зберігання і відображення отриманих теплових зображень (термограм) в зручній графічній формі здійснює ПК або КПК. Така конструктивна схема дозволяє уникнути присутності оператора в зоні проведення фізичного експерименту, а зручний інтерфейс оригінального програмного забезпечення і можливість розширення його функцій сприяють гнучкої трансформації системи при здійсненні різнопланових досліджень. Спектральний діапазон АТП визначається вибором детектора і оптичної системи, які можуть бути змінені відповідно до задачі.

2.2 Фотоприймальний пристрій

Цей блок було розроблено автором у ході виконання курсової роботи бакалавра [11]. До складу його входить чутливий елемент, система його охолодження і попередній підсилювач.

2.2.1 *Інфрачервоні детектори* є основним елементом високоефективних систем широкоформатного прийому теплових зображень з високим температурним і просторовим розрізненням [14], які мають, перш за все, забезпечувати високу ефективність перетворення випромінювання. Вимоги до цих детекторів, як правило, значно відрізняються в залежності від конкретного використання. Це, насамперед, пов’язано зі спектральним складом випромінювання, яке реєструється, фоновою обстановкою в реальних умовах

застосування тепловізійної апаратури та необхідною швидкодією. Створення універсального детектора з оптимальними для різного призначення характеристиками дотепер не здійснено.

В умовах земного фону з температурою 300 К віддається перевага ІЧ-детекторам з азотним рівнем охолодження. Найбільш поширені фотонні детектори випромінювання мають значну селективність чутливості за спектральним діапазоном, що залежить від ширини забороненої зони напівпровідника, або глибини розташування енергетичних рівнів активних домішок. У довгохвильовій ІЧ області зараз переважно використовують фоторезистори та фотодіоди на основі CdHgTe для довжини хвиль реєстрованого випромінювання менше 20 мкм. Застосування детекторів на основі домішкових германію та кремнію з граничною довжиною хвилі 20 мкм значно ускладнюється потребою їх охолодження до 4,2 К [25].

Другим, принципово іншим типом ІЧ приймачів, є теплові болометричні детектори [14]. Їх чутливість не залежить від довжини хвилі сприйнятого випромінювання. Особливим класом теплових приймачів випромінювання є надпровідникові болометри, дія яких заснована на різкій зміні електричного опору при переході надпровідникових матеріалів з нормального стану в надпровідний. З точки зору азотного рівня охолодження чутливих елементів приймальних систем, більш значних успіхів у цьому напрямку слід очікувати на шляху використання високотемпературних надпровідникових (ВТНП) болометрів [9, 32].

Так як АТП призначений для рішення різнопланових наукових задач, при розробці було закладено можливість використання різних детекторів, що являється привабливою особливістю цієї моделі.

По-перше, конструкція і розміри механічного кріплення кріостатів у розробленому АТП дозволяє використовувати два види комерційних фотоприймальних пристроїв - азотного і гелієвого рівня охолодження [30, 31]. Додатково ми розробили такого ж розміру (діаметром 50 мм і висотою 130 мм) розбірний оптичний кріостат азотного рівня охолодження, в якому можуть бути

розміщені різноманітні детектори (від 1 до 8-ми чутливих елементів), у тому числі фоторезистри, що мають область чутливості у вікні прозорості атмосфери 3-5 мкм (наприклад, на основі InSb), фоторезистори на вікно прозорості атмосфери 7-14 мкм (CdHgTe), неселективні болометричні приймачі, у тому числі ВТНП (наприклад, плівкові YBaCuO елементи [29,30]), а також малоформатні смужки (до 8-ми елементів) перелічених приймачів

2.2.2 *Система охолодження (кріостат)* використовується для охолодження чутливих елементів до азотного рівня. Автором раніше було розроблено спеціальний розбірний оптичний кріостат заливного типу (див. [11]). У ході курсової роботи бакалавра було визначено вимоги до кріостату та проведено його тепловий розрахунок. Отримані в результаті теплового розрахунку складові максимальних теплопритоків, при яких забезпечується час роботи без додаткової заливки азоту 4 години (час випаровування всього об'єму рідкого азоту) приведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Потужність складових теплопритоку до внутрішньої склянки кріостату

Вид притоку тепла	$W_{че}$	$W_{оп}$	$W_{пр}$	$W_{вип}$	$W_{газ}$	$W_{євті}$	Сумарний приток тепла	Допустимий приток тепла
Потужність, Вт	0,10	0,20	0,03	0,07	0,04	0.77	1,21	1,23

Згідно вимогам та проведеним розрахункам теплових витрат кріостату було розроблено його конструкцію. Складальний ескіз розробленого малогабаритного розбірного оптичного кріостату приведено на рисунку 2.2.

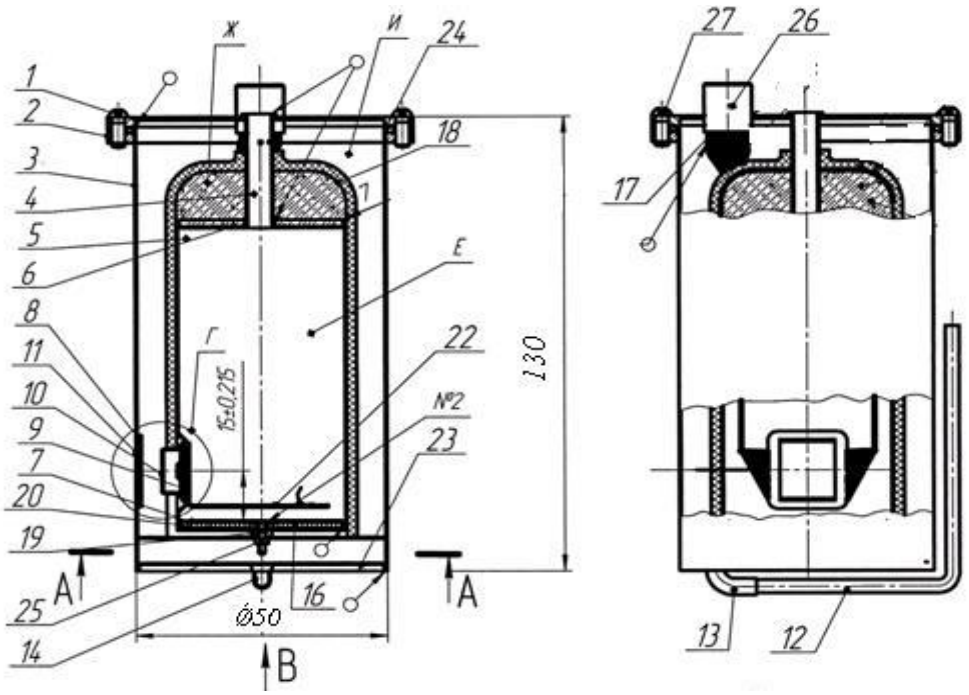


Рисунок 2.2. Складальний ескіз розбірного кріостата: 1 – кришка, 2 - гвинт, 3 – зовнішній стакан, 4 – трубка, 5 – внутрішній стакан, 6 – клей, 7 – дно, 8 – вікно, 9 – посадочне місце, 10 – бленда, 11 – прокладка, 12, 13 – відкачка трубка, 14 – центрівка, 15 – розпірка, 16, 18 - адсорбент, 17 – проводи, 18 - бязь, 19 – ось, 20 – мідна сітка, 22 – мідна пластина, 23 – дно зовнішнього стакану, 24 – прокладка, 25 – гайка, 26 – роз'їм, 27 – гвинт, 28 – чутливий елемент.

2.2.3. *Попередній підсилювач* був розроблений для посилення сигналу фотовідгука одного чутливого елемента (коефіцієнт посилення К = 200, шумова напруга $U_ш \leq 2$ нВ/Гц$^{1/2}$.). Для випадку використання смужки приймачів на одній платі буде розташовано 8 попередніх підсилювачів. Це дозволяє досягти обмеження порогової чутливості фотодетекторів тільки природними флуктуаціями навколишнього фону (BLIP - режим) [13]. Попередній підсилювач здійснює узгодження електричного опору фотоприймача з подальшою електронікою і формування необхідної амплітудно-частотної характеристики всього сигнального тракту (0 ÷ 100 кГц). Принципова електрична схема, відповідна друкована плата та монтажна схема, а також зовнішній вигляд плати попереднього підсилювача для одного КРТ детектора приведено в [11] на рисунках 3.2 -3.4.

2.3 Оптико-механічний блок

У ході переддипломної практики був розроблений оптико-механічний блок АТП, до складу якого входять модулятор, об’єктив і сканер

2.3.1. *Модулятор* теплового потоку надає можливість дистанційного вимірювання просторового розподілу абсолютної температури досліджуваних об'єктів. Він представляє собою металеву шторку з відомим коефіцієнтом випромінювання (≈ 0,98), яка розташовується на оптичній осі перед сканером. В кінці кожного кадру (під час зворотного ходу дзеркала кадрової розгортки) поле зору системи повністю перекривається шторкою і на детектор надходить тільки потік випромінювання з її поверхні. Температура шторки контролюється сигнальним процесором електронного блоку за допомогою напівпровідникового мікротермометра. Це дозволяє програмному забезпеченню АТП поставити у відповідність величині потоку випромінювання, що реєструється детектором, абсолютне значення температури. Іншими словами, вимірювання температури об'єктів, що потрапляють в поле зору системи, проводиться щодо еталонного випромінювача з відомими параметрами (температура, коефіцієнт випромінювання). Та обставина, що модулятор розташований на вході всієї оптичної системи, дозволяє виключити похибку вимірювання, пов'язану з температурними коливаннями поверхонь скануючих дзеркал і об’єктиву. Положення шторки, що відповідає її закритому стану фіксується оптоелектронним датчиком.

2.3.2 Об’єктив. Для цілей лабораторних досліджень для АТП були розраховані та розроблені два взаємозамінних об'єктива. Перший об'єктив (дзеркальний об'єктив Кассегрена) має апертуру D = 32 мм, світлосилу 1:2,25 і призначений для вирішення завдань в короткохвильовій і довгохвильовій частині ІЧ спектра (у поєднанні з неселективними приймачами, такими як

ВТНП болометр, - див. розділ 2.2.1). Другий об'єктив, призначений для роботи АТП в діапазоні (2 ÷ 18) мкм, складається з 2-х змінних просвітлених германієвих лінз. Апертура цього об'єктива D = 32 мм, світлосила 1:1 і коефіцієнт пропускання зображення ≈ 0,9.

Лінзовий і дзеркальний об’єктиви мають однакові габаритні розміри, однакове кріплення до екрану фотоприймального пристрою і є взаємозамінними. Фокусування зображення здійснюється вручну переміщенням об'єктива вздовж оптичної осі системи за допомогою спеціального редуктора.

На сьогоднішній день для ІЧ техніці для спектрального діапазону (2 ÷ 18) мкм в основному використовуються переломлюючи (лінзові) системи. При якісній обробці поверхонь, правильному вибору матеріалу лінз та покриттів, що просвітлюють, можна зробити компактний об'єктив з високими характеристиками. При цьому з метою підвищення чутливості в цьому діапазоні часто вибирають оптику з відносним отвором 1:1. Якісно скорегований об'єктив з декількох лінз може забезпечити миттєве поле зору, близьке до дифракційної межі для даного діапазону довжин хвиль.

При розрахунку лінзового об'єктива, призначеного для використання в АТП сумісно з селективними фотоприймачами в діапазоні (2 ÷ 18) мкм, вихідними вимогами являлися:

- Відносний отвір D/f = 1:1 для забезпечення максимальної чутливості системи.
- Пляма розсіювання не повинна перевершувати розмір одного чутливого елементу (40÷50) мкм.
- Задній відрізок (відстань від останньої лінзи до поверхні фотоприймача) не повинен бути менше, ніж відстань від фотоприймача до зовнішньої поверхні вхідного вікна кріостату.
- Діапазон фокусування – від 0,3 м до нескінченості.
- Кут зору об'єктива – максимальний
- Аберації (як геометричні, так і хроматичні) - мінімальні.

Матеріалом для виготовлення лінз об’єктиву був обраний Ge, бо він відносно доступний, має малі втрати на поглинання та малу дисперсією у спектральному діапазоні (2÷18) мкм [33]. Але високий показник заломлення цього матеріалу вимагає нанесення на його поверхню покриття, що просвітлює, для зменшення втрат на відбиття у робочому спектральному діапазоні.

З урахуванням вище приведених вимог і користуючись [14, 24] було проведено математичний розрахунок і розроблено інфрачервоний лінзовий об’єктив, оптична схема якого приведена на рисунку 2.3. Цей об'єктив складається з 2-х змінних просвітлених германієвих лінз. Він має забезпечити фокусування зображення в АТП при роботі з фотоприймачами, які мають діапазон чутливості у вікнах прозорості атмосфери (2÷5) мкм (наприклад, InSb) та (7÷14) мкм (наприклад, CdHgTe). Матеріал просвітлення SiO_2 – для діапазону (2÷5) мкм і сульфід цинку ZnS товщиною 1,15 мкм – для діапазону (7÷14) мкм) [14, 33].

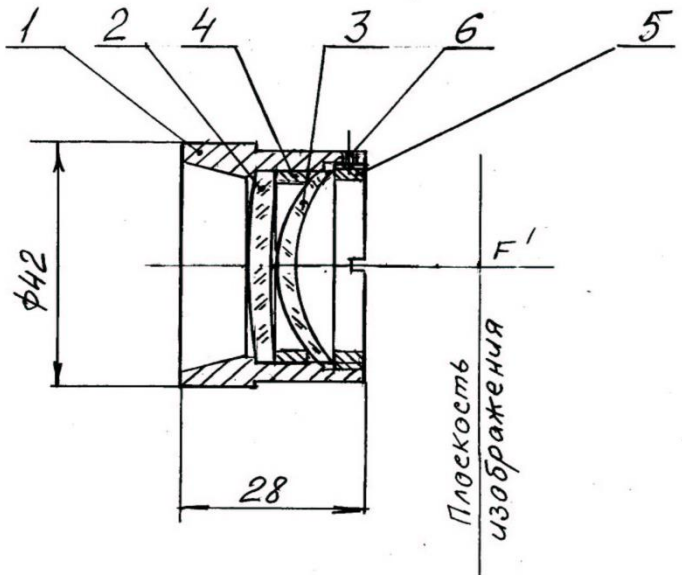


Рисунок 2.3. Складальний ескіз об’єктиву для АТП: 1 – корпус, 2, 4 - лінзи, 3 – кільце. 5 – гвинт, 6 - гайка

Відповідно до оптичної схеми лінзи розміщуються у металевому корпусі, який, у свою чергу, розташовано безпосередньо перед вхідним вікном кріостата. Фокусування зображення на чутливий елемент здійснюється рухом

об'єктиву удовж оптичної осі системи за допомогою спеціального редуктора (система фокусування). Розроблений двохлінзовий ІЧ об’єктив має забезпечити параметри, приведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Основні параметри 2-х лінзового об’єктива

Робоча ділянка спектра, мкм	2-18
Фокусна відстань, F, мм	32,4
Відносний отвір, D/F	1:1
Кут зору, град.	24
Коефіцієнт пропускання зображення	>0,9
Діаметр кола розсіювання, мм	0,04
Діапазон пере фокусування від ∞ до 0,3 м, мм	1,2

2.3.3. Система сканування здійснює переміщення миттєвого поля зору детектора по досліджуваному об'єкту. Для того, щоб отримати якісне зображення, тобто реалізувати високу роздільну здатність як по температурі, так і по просторовим координатам, зображення повинне бути мало викривленим, а кадрова частота достатньою для зручності спостереження. Крім того, ширина спектру відеосигналу повинна бути мінімальною для зменшення шумів. Аналіз повинний бути максимально лінійним, а розгортка – пилкоподібною для зменшення мертвого часу (час повернення дзеркала у початкову точку). У разі використання одноелементного приймача теплового випромінювання найкращим для реєстрації просторового розподілу теплового поля досліджуваних об'єктів являється порядковий алгоритм сканування.

Сканування поля з максимальними розмірами y по горизонталі і z по вертикалі при розмірі миттєвого поля зору dy*dz дає yz/dy точок зображення в кадрі, тобто N (yz/dy*dz) точок в секунду, де N - частота повторення кадрів. Відповідний електричний сигнал s (t), що надходить з приймача, має період [24]:

$$T = (2/N)(dydz/yz) \quad (1.2)$$

Необхідна смуга пропускання частот сигналу від нуля (постійний фон) до цієї максимальної частоти, отже, дорівнює:

$$\Delta\upsilon = (1/2)(Nyz/dydz) \quad (1.3)$$

Щоб покращити чутливість системи в перехідному режимі, смугу відеосигналу подвоюють. Тоді величина необхідної ширини смуги залежно від числа елементарних точок зображення в секунду визначається, як:

$$\Delta\upsilon = \mathrm{N}(yz/dydz) \quad (1.4)$$

Так як для деяких наукових задач може знадобитися підвищення кадрової частоти, у АТП закладено можливість використання смужки (до 8-ми) чутливих елементів. Для цього випадку принципом сканування обрано коливання плоского дзеркала у напряму, перпендикулярному смужці фоточутливих елементів - горізонтальне коливання дзеркала при вертикальному розміщенні лінійки фотоприймачів. При цьому за один горизонтальний прохід смужки реалізується відразу n строк, n миттєвих полів зчитується у паралель, і смуга пропускання відеосигналу у цьому випадку складає:

$$\Delta\nu = (1/2)(Nyz/ndydz) \text{ або } \Delta\nu = Nyz/ndydz), \quad (1.5)$$

де y,z – відповідно максимальні розміри по горизонталі та вертикалі поля, що сканується; dy, dz – відповідні розміри миттєвого полю зору; yz/dydz – кількість пікселів зображення у кадрі; N – кадрова частота; n – кількість строк (кількість елементів у лінійці приймачів).

Перевага такої розгортки полягає в тому, що швидкість сканування зменшується, смуга пропускання звужується в n раз, відношення сигнал/шум збільшується в $n^{1/2}$. До недоліків такої розгортки відноситься поява геометричного шуму із-за поелементного розкиду чутливості та шумів [14].

У ході переддипломної практики автором було розроблено конструкцію сканеру АТП. Повне зображення прямокутного формату у розробленому сканері досягатиметься шляхом використання комбінації двох розгорток - рядкової (горизонтальної) і перпендикулярної до неї кадрової. Сканування в горизонтальній площині здійснюється за допомогою дзеркала, що коливається, розміром (36 х 50) мм^2, закріпленого на плоскій сталевій пружині. Резонансні коливання такої системи досягаються шляхом подачі послідовності прямокутних імпульсів на котушки електромагнітів, розташованих під металевою платформою, на якій закріплено дзеркало. У даній конструкції резонансна частота, що задається масою дзеркала, геометрією і жорсткістю пружини, становить $f_r \approx 100$ Гц. Послідовності імпульсів управління електромагнітами формуються контролером сканера. Миттєве положення дзеркала відстежується за допомогою датчика, що представляє собою оптопару світлодіод-фотодіод з відкритим оптичним каналом, на виході якого формується електричний сигнал, пропорційний куту повороту дзеркала.

Інше дзеркало розміром (60 х 60) мм^2 проводить сканування у вертикальній площині. Привід вертикального скануючого дзеркала буде здійснюватися від уніполярного чотирьохфазного крокового двигуна з кутовим значенням кроку 1,8 град. Для забезпечення необхідного миттєвого кута повороту зображення в площині фотоприймача і заданого повного кута зору буде використаний редуктор з коефіцієнтом розподілу 30. Керуюча послідовність електричних імпульсів для обертання двигуна в прямому і зворотному напрямках має генеруватися сигнальним процесором електронного блоку за закладеним програмним алгоритмом. Для позначення крайнього положення дзеркала буде використаний оптоелектронний датчик.

Обидва дзеркала виготовлюються зі спеціального скла (скло для фотографічних пластин) і покриті алюмінієвою плівкою для забезпечення хорошого відображення в широкому спектральному діапазоні. Закон сканування може бути змінений залежно від використовуваного приймача

(одиночний або масив до 8-ми елементів) і розв'язуваної задачі. Складально-габаритний ескіз розташування елементів розгортки приведено на рис. 2.4.

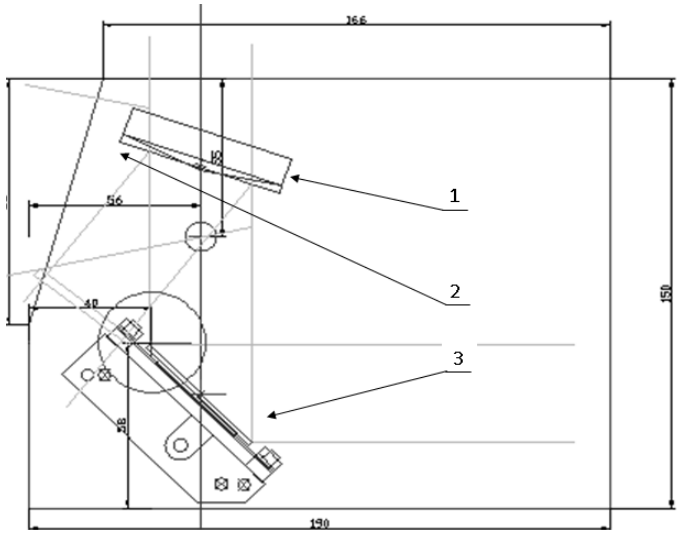


Рисунок 2.4. Складально-габаритний ескіз розташування елементів розгортки: 1 – блок кадрової розгортки, 2 – вхідне вікно, 3 – блок строкової розгортки.

2.4 Електронний блок

Блок-схема електронного блоку АТП приведено на рисунку 2.5.

Електронний модуль АТП виконаний на базі сигнального процесора ADSP-2188, що представляє собою 16-ти розрядний мікрокомп'ютер з високою швидкістю виконуваних команд і розвиненим інтерфейсом для підключення периферійних пристроїв, таких як аналого-цифровий перетворювач (АЦП), цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Конструктивно електронний модуль може бути умовно розділений на наступні функціональні блоки: блок керування сканером, блок обробки відеосигналу і інтерфейсний контролер.

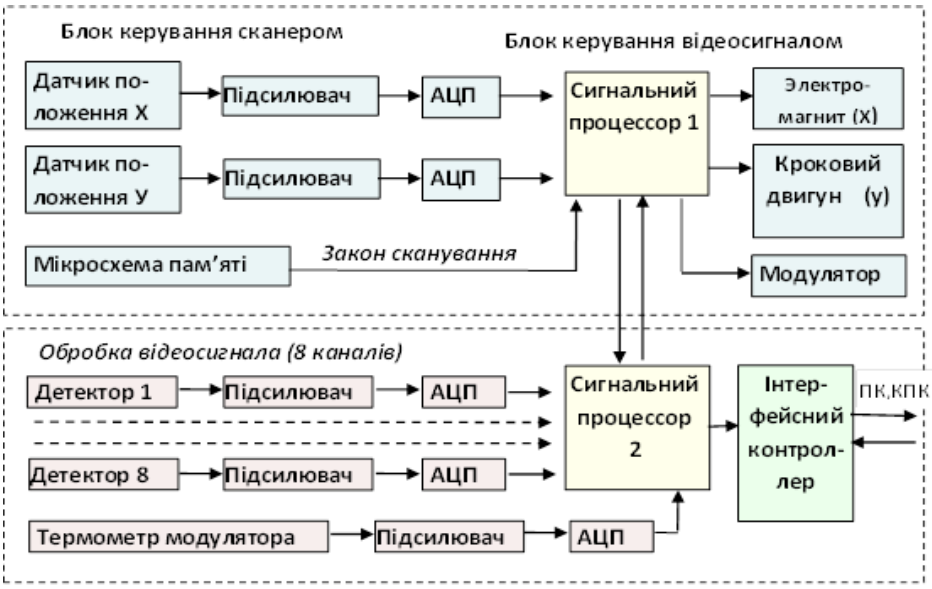


Рисунок 2.5. Блок-схема електронного блоку АТП.

Розглянемо блок керування сканером. При включенні живлення на котушках електромагнітів рядкової розгортки (див. рисунок 2.5) з'являються кидки електричного струму, які призводять до виникнення слабких затухаючих резонансних коливань дзеркала. За допомогою 12-ти розрядного аналого-цифрового перетворювача сигнал датчика положення дзеркала перетворюється в цифрову форму (частота вибірок 200 кГц) і далі в реальному часі обробляється процесором, програмне забезпечення якого відстежує миттєве положення дзеркала і виробляє послідовність керуючих електричних імпульсів, що забезпечують почергове включення електромагнітів. Завдяки такому електромеханічному позитивному зворотному зв'язку фаза і частота імпульсів автоматично встановлюються таким чином, що порушуються і підтримуються незгасаючі резонансні коливання дзеркала з великою амплітудою (повний кут відхилення ≈ 0,8 рад). Крім того, сигнальний процесор відстежує інтегральне значення амплітуди коливань за кілька періодів і за спеціальним алгоритмом виробляє регулювання підводиться до електромагнітам потужності шляхом зміни тривалості імпульсів управління, тим самим здійснюючи стабілізацію амплітуди коливань дзеркала на заданому рівні. Установка необхідної

амплітуди коливань здійснюється зміною коефіцієнта передачі підсилювача датчика положення. Така схема включення дозволяє підтримувати стабільним заданий повний кут повороту дзеркала при зміні резонансної частоти внаслідок коливань температури навколишнього середовища (≈ 5 Гц в температурному інтервалі 0 ÷ 40 С).

Початкове і кінцеве кутове положення горизонтального дзеркала, відповідне початку і кінцю рядку растра сканування, що формується, (рядку зображення), супроводжується сигналами малої синхронізації, що генеруються процесором. Часова залежність кута повороту дзеркала є синусоїдальної і має сильну нелінійність на краях. Щоб уникнути видимих геометричних спотворень на тепловому зображенні, сигнали рядкової синхронізації формуються на квазілінійних ділянці цієї залежності. При цьому кутовий розмір рядка зображення приблизно в два рази менше повного кута відхилення дзеркала. Для збільшення коефіцієнта використання рядкової розгортки (≈ 0,5) сканування об'єкту в горизонтальній площині проводиться під час прямого і зворотного ходів дзеркала. На рисунку 2.6 приведено функціональну схему горизонтальної розгортки.

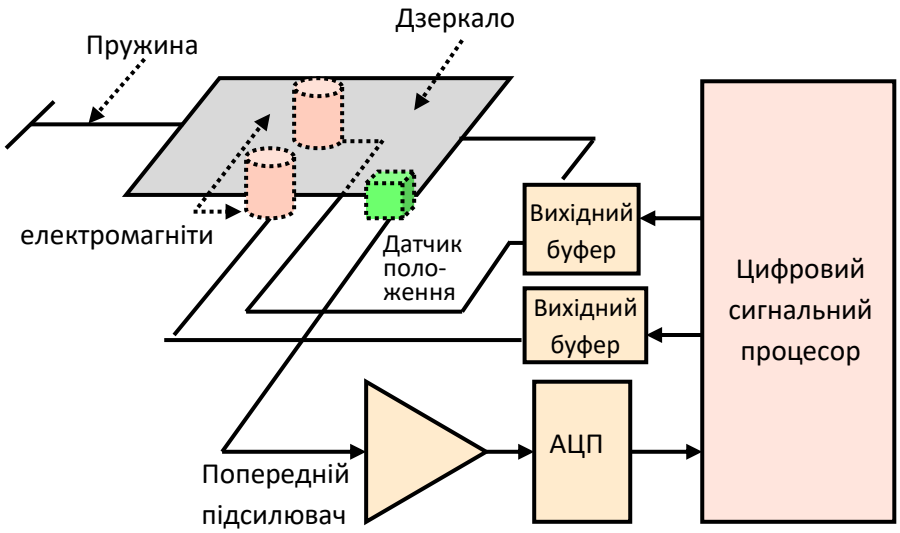


Рисунок 2.6. Функціональна схема горизонтальної розгортки

Керування кроковим двигуном приводу дзеркала вертикальної розгортки також здійснюється сигнальним процесором. Під час сканування з приходом кожного імпульсу рядкової синхронізації, що відповідає кінцю рядка, ротор двигуна повертається на один крок. При цьому кадрове дзеркало робить кутове переміщення на 1,5 мрад. Двигун має досить високу швидкість перемикання (≈ 1,8 мс). У зв'язку з цим до моменту приходу імпульсу синхронізації, що відповідає початку наступного рядка сканування, ротор встигає зайняти стійке положення. Крім того, редуктор приводу кадрової розгортки демпфірує паразитні коливання дзеркала під час перемикання. Геометричних спотворень на тепловому зображенні, відповідних перехідним процесам при роботі двигуна не повинне бути.

У тілі мікропрограми процесора організовано лічильник рядків, який отримує приріщення на 1 після сканування кожного рядка формованого растра. Кількість рядків у растрі буде задаватися програмно і досягатиме 256. При переповненні лічильника рядків під управлінням процесора кадрове дзеркало повертається у вихідне крайнє положення (зворотний хід), яке фіксується оптичним датчиком. Під час зворотного ходу сигнали рядкової синхронізації ігноруються і переміщення кадрового дзеркала в початковий стан відбуватиметься швидко (≈ 500 мс). Після цього програмний лічильник рядків обнуляється, генерується сигнал кадрової синхронізації і сканер починає формування нового растру. Під час зворотного ходу кадрового дзеркала також на короткий час закривається шторка модулятора теплового потоку, що супроводжується відповідним сигналом.

Блок обробки відеосигналу (див. рис. 2.5) повністю здійснює обробку відеосигналу в цифровій формі. З цією метою сигнал з чутливого елемента перетворюється в 12-ти бітний цифровий потік даних (частота вибірок 100 кГц). Узгодження динамічних діапазонів фотоприймального пристрою та аналого-цифрового перетворювача здійснюється за допомогою малошумливого підсилювача. Електронний модуль включає 8 незалежних паралельних каналів

обробки відеосигналу, так що одночасно можна знімати і обробляти інформацію з 8-ми детекторів. Сигнальний процесор здійснює цифрову фільтрацію відеосигналу в реальному часі, віднімання складової сигналу, що відповідає фону, а також формування двомірного масиву числових даних про просторовий розподіл інтенсивності теплового поля, що реєструється, для передачі в персональний комп'ютер (кишеньковий персональний комп'ютер) і виведення ІЧ зображення відповідного формату в пікселях. Формат зображення по вертикалі і горизонталі визначається кількістю рядків растра сканування (256 рядків) і частотою вибірок відеосигналу відповідно. За один період коливань дзеркала рядкової розгортки (10 мс) формується 2 рядки зображення. Так як коефіцієнт використання рядкової розгортки дорівнює 0,5, то частота вибірок 100 кГц забезпечує 256 елементів в кожному рядку зображення.

В оперативній пам'яті даних процесора організовано два буфера (для рядків з парними і непарними номерами) розміром по (256 х 2) байт кожен для тимчасового зберігання числової інформації про кожен елемент рядка зображення. Заповнення буферів синхронізується сигналами малої синхронізації, які генеруються блоком управління сканером. Після заповнення кожного з буферів (закінчення сканування рядки) генерується сигнал інтерфейсному контролеру для ініціалізації обміну даними з персональним комп'ютером і передачі поточного рядка зображення. Також передається номер рядка. Це дозволяє легко синхронізувати формування ІЧ зображення і його візуалізацію. Використання роздільної буферізації даних для парних і непарних рядків дозволяє значно послабити вимоги на швидкість обміну даними з ПК.

Останній рядок кожного кадру заповнюється даними з мікротермометра, закріпленого на поверхні модулятора теплового потоку. З цією метою по сигналу датчика положення модулятора, що відповідає його закритому стану (під час зворотного ходу кадрового дзеркала), електронний мультиплексор MUX на короткий час перемикає АЦП до вихідного підсилювача мікротермометра. Як мікротермометр використовується емітерний перехід безкорпусного транзистора, який живеться від термостабілізованого джерела

постійного струму. Крім того, програмне забезпечення процесора зберігає усереднене значення сигналу фотовідгука на випромінювання з поверхні шторки, яке віднімається від загального відеосигналу під час сканування наступного кадру. Це дозволяє робити прив'язку сигналів на потоки випромінювання, що реєструються, до абсолютного значення температури. Блок обробки відеосигналу формує також сигнал про закінчення сканування кадру, він передається інтерфейсному контролеру для синхронізації обміну даними з ПК.

Інтерфейсний контролер (див. рис. 2.5) служить для обміну даними з PC через універсальну послідовну шину (USB). Інтерфейсний контролер пов'язаний з внутрішнім контролером прямого доступу до пам'яті сигнального процесора і має здійснювати формування та передачу цифрового потоку даних в ПК або КПК відповідно до специфікації стандарту USB 2.0 (High Speed) або USB 1.0. Інтерфейсний контролер виконаний на базі FT245R чіпу, що включає в себе паралельний інтерфейс з FIFO буфером і USB приймач, що дозволяє реалізувати високу швидкість передачі інформації (≈ 1 Мбайт / с). Передача інформації здійснюється порядково по керуючому імпульсу блоку обробки відеосигналу, який відповідає заповненню рядкового буфера сигнального процесора.

2.5 Корпус та елементі кріплення

Згідно розробленим вимогам (див. підрозділ 2.1.) було розроблено корпус АТП та відповідні елементи кріплення окремих блоків. Складальний ескіз розташування блоків у корпусі, ескізи стінок, елементів кріплення модулів та інші деталі АТП приведено на рисунку 2.7.

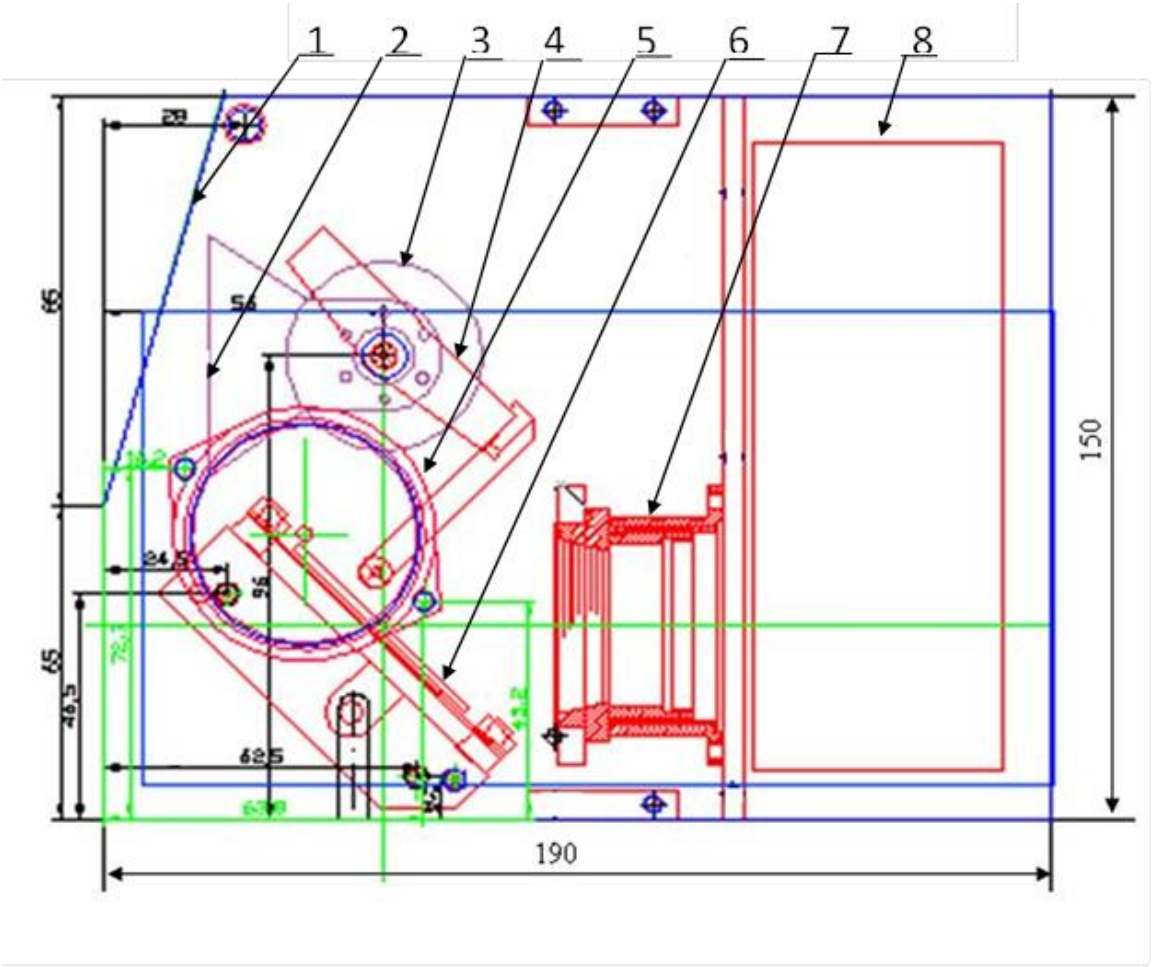


Рисунок 2.7. Складально-габаритний ескіз розташування блоків в АТП: 1 – вхідне вікно, 2 – модулятор (шторка), 3 – шестерня, 4 – блок кадрової розгортки, 5 – крововий двигун, 6 – блок строкової розгортки, 7 – об’єктив, 8 – кріостат

2.6. Виготовлення окремих блоків та збірка АТП

Відповідно до технічних і конструктивних вимог до кожного модуля АТП було виготовлено всі необхідні оптико-механічні та електронні блоки і деталі, у тому числі: фотоприймальний блок, система сканування, модулятор, оптична система, система фокусування, електронний блок, корпус, елементі кріплення та інші вузли. Нижче на рисунках 2.8 – 2.11 приведено зовнішній вигляд деяких вузлів АТП.

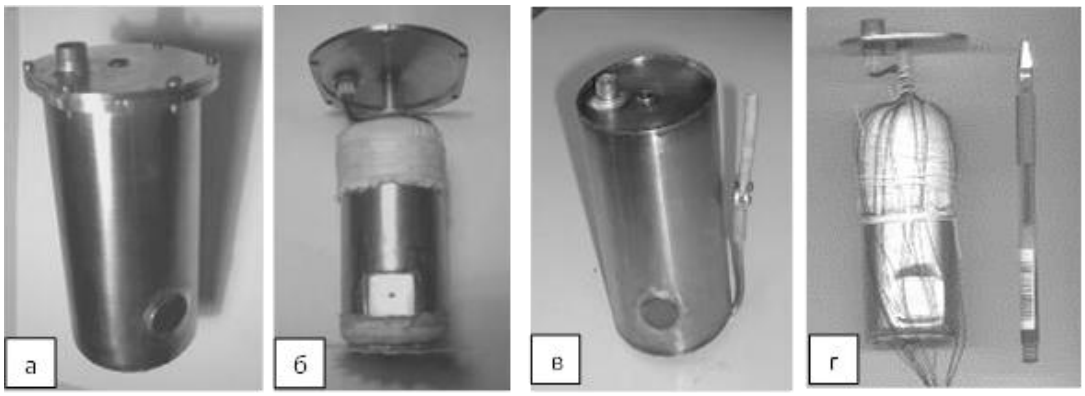


Рисунок 2.8. Зовнішній вигляд систем охолодження (кріостатів), розроблених та виготовлених для АТП: а) розбірний кріостат; б) внутрішня склянка розбірного кріостату; в) нерозбірний кріостат; г) внутрішня склянка нерозбірного кріостату.

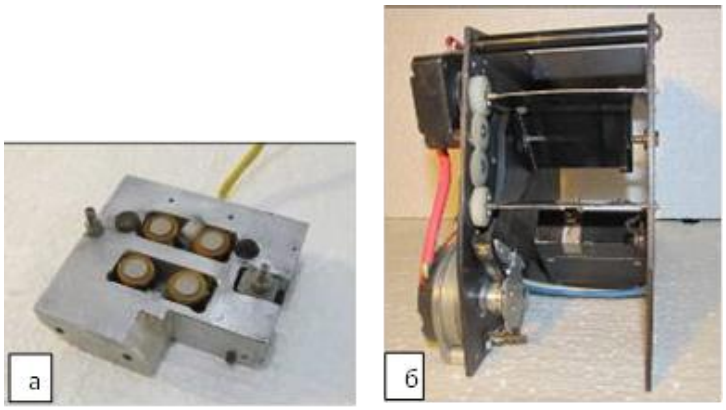


Рисунок 2.9. Блок розгортки та модулятор: а) платформа блока рядкової розгортки (до почорніння) з розміщеними котушками електромагнітів; б) закріплені на бокових стінках блок рядкової та кадрової розгорток (без дзеркал) і модулятор у відкритому положенні

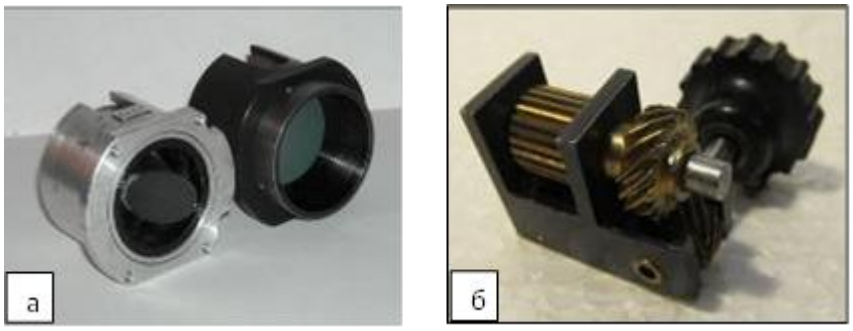


Рисунок 1.10. Блоки оптичний та фокусування: а) об’єктиви (лівий – дзеркальний об’єктив Кассегрена, правий - линзовий); б) редуктор для переміщення об’єктивів в процесі фокусування зображення

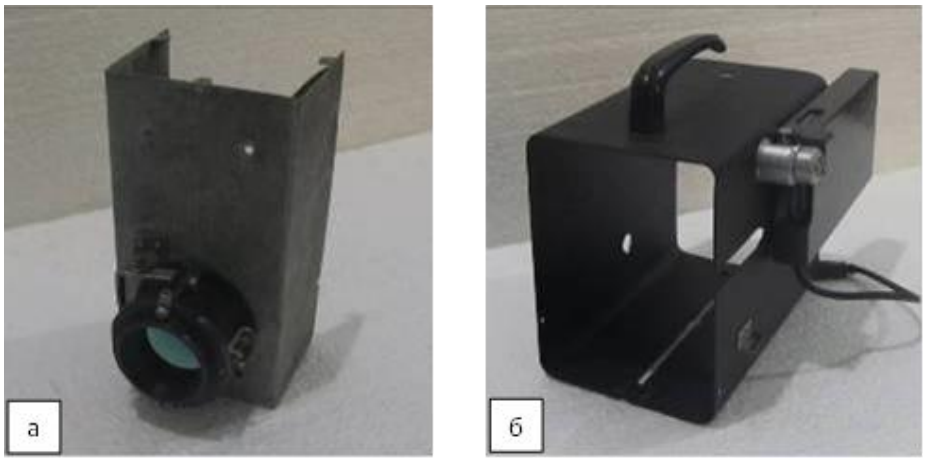


Рисунок 2.11. Деталі АТП: а) екран для розміщення фотоприймального пристрою з закріпленим лінзовим об’єктивом; б) фрагмент корпусу (без задньої та передньої стінки) з закріпленим КПК.

Збірка та налагодження АТП було здійснено після виготовлення всіх блоків, деталей та елементів. На рисунку 2.11 (а також на рис.2.9 (в)) приведено деякі етапи збірки (закріплення на бокових стінках сканера та друкованих плат електронного блоку).

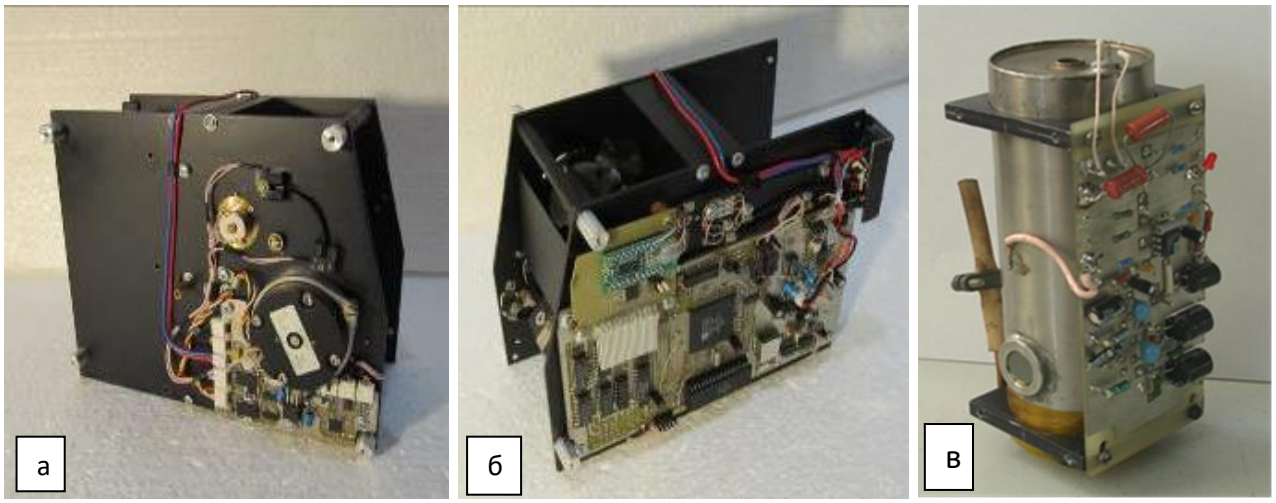


Рисунок 2.12. Етапи збірки АТП: а) на боковій стінці внизу закріплено плата керування кроковим двигуном приводу дзеркала кадрової розгортки та двигуном приводу шторки; б) на протилежній боковій стінці закріплена плата електронного блоку; в) на кріостаті з вже встановленим детектором закріплено плату попереднього підсилювача.

Наступним кроком збірки була установка фотоприймального блоку, який складається з кріостату з розміщеним в ньому приймачем та попереднього підсилювача, в спеціальний екранований відсік (див. рис. 2.11 (а)). Оскільки аналізатор теплових полів призначений для рішення різнопланових наукових задач, в АТП при розробці було закладено можливість використання різних детекторів, що є привабливою особливістю цієї моделі. Було підготовлено декількох детекторів, у тому числі одноелементний фоторезистор на основі CdHgTe розміром (40 х 40) мкм, смужка з 8-ми фоторезисторів CdHgTe з розміром одного елемента (50 х 50) мкм для реєстрації інфрачервоного випромінювання з довжиною хвилі (8-14) мкм та неселективний одноелементний високотемпературний надпровідниковий (ВТНП) болометр розміром (50 х 50) мкм у вигляді плівкового меандру YBaCuO на підкладці з $LaAlO_3$ [32]. Усі перелічені детектори було по черзі встановлено у створений розбірний оптичний кріостат (рис. 2.8 (а)), і їх характеристики було виміряне на спеціальному стенді, у склад якого входить модель абсолютно чорного тіла, модулятор, набір інфрачервоних дисперсійних фільтрів та інша вимірювальна апаратура. По результатам вимірювань було визначено оптимальну робочу точку для кожного детектора (струм та робоча температура), при якому реалізується максимальне відношення сигнал/шум, та були отримані спектральні характеристики чутливості. У таблиці 2.3 приведено основні параметри усіх детекторів, виміряних при оптимальному робочому струмі (для смужки КРТ фотоприймачів у таблиці приведено середнє по елементам значення параметрів). Відповідно до отриманих параметрів детекторів було розраховано параметри попередніх підсилювачів до кожного з них.

Таблиця 2.3

Основні параметри детекторів для АТП

Детектор / Параметр	Одноелементний КРТ детектор	Смужка 8-ми КРТ детекторів	ВТНП Болометр
Розмір чутливого елемента, мкм	40x40	(50x50) x 8	50x50
Робоча температура, К	80	80	81,0
Спектральный диапазон, мкм	8-13	8-12	1-30
Вольт - ватна чутливість, В/Вт	$4*10^4$	$1.2*10^4$	20
Виявляльна здатність, см*$Вт^{-1}Гц^{1/2}$	$1.2*10^{10}$	$8*10^9$	$5.5*10^8$

З таблиці видно, що найкращі параметри мають фотоприймачі на основі КРТ. Оскільки смужка з 8-ми елементів має достатньо великий розкид по елементам, для випробування в реальних умовах було обрано одноелементний КРТ приймач розміром (40 х 40) мкм.

Таким чином в цілях довготривалого використання АТП в реальних умовах, діючий зразок АТП було зібрано з фотоприймальним блоком на основі одноелементного КРТ приймача у поєднанні з оптичним блоком на основі лінзового германієвого об'єктиву. Однак, слід зазначити, що, завдяки блочній структурі апаратної частини, конструкції кріплень та універсальному 8-ми канальному електронному блоку, при необхідності (відповідних задачах тепловізійного аналізу) фотоприймальний та оптичний блоки можуть бути замінено.

Згідно вимогам, діючий зразок АТП має працювати в двох варіантах – у вигляді переносного мобільного приладу з закріпленим КПК, або у варіанті з підключеним ПК з великим екраном (з закритим або знятим КПК). Зовнішній вигляд зібраного діючого прототипу моделі №2 в обох варіантах конструкції представлено на рисунку 2.13.



Рисунок 2.13. Зовнішній вигляд діючих зразків АТП в двох варіантах конструкції.

Лабораторні іспити проградуйованого приладу проводились на спеціальному стенді, який має у своєму складі моделі АЧТ, набір мір Фуко, набір ІЧ дисперсійних фільтрів тощо. Лабораторні випробування проводилися відповідно методикам вимірювання параметрів ІЧ систем [14].

Вимірювалися наступні параметри та характеристики АТП:

- температурна роздільна здатність (температурна чутливість);
- розкид температурної чутливості по полю;
- просторова роздільна здатність;
- число елементів роздільної здатності;
- спектральна чутливість;
- час кадру;
- поле зору (по вертикалі та горизонталі);
- діапазон вимірювальних температур;
- точність вимірювання температури в усьому діапазоні температур;
- мінімальна відстань до об’єкту;
- стабільність параметрів у часі (дрейф);
- залежність параметрів приладу від параметрів навколишнього середовища;

- кількість рідкого азоту для охолодження приймача;
- час виходу на режим (час охолодження приймача до робочої температури);
- час роботи приладу без додаткової заливки хладогенту;
- час автономної (від акумулятора) роботи приладу;
- вага та габарити приладу.

Основні параметри АТП, отримані в результаті лабораторних іспитів, приведено у таблиці 2.4. Всі параметри відповідають вимогам до АТП.

Таблиця 2.4

Основні параметри діючого зразку АТП

Модель АТП	2
Кількість елементів приймача	1
Кількість елементів розподільної здатності	256 x 256
Спектральній діапазон, мкм	8-14
Робоча температура, ^{0}К	78
Просторова роздільна здатність, мрад	1,5
Температурна чутливість при 30^{0}С, ^{0}С	0,1
Частота кадрів, Гц	1
Поле зору, град.	25H x 25V
Діапазон вимірювальних температур, ^{0}С	-20…+200
Точність вимірювання температури, %	±2
Час роботи без доливання хладогенту, год.	5

3 СТВОРЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АТП

Згідно з вимогами до АТП (див. підрозділ 2.1) система повинна мати оригінальне багатофункціональне програмне забезпечення, зручне для теплового аналізу при наукових та медичних дослідженнях. Крім того, програми повинні мати модульну структуру з можливістю доступу для зміни або доповнення функцій, створення спільного інтерфейсу, тощо.

Відповідно конструктивним вимогам, АТП розроблений у двох варіантах конструкції: стаціонарний варіант (з зовнішнім ПК) та мобільний варіант (з вбудованим КПК), при тому, один зразок моделі може використовуватися в обох варіантах конструкції.

У першому (стаціонарному) варіанті інтерфейсний контролер видеоблоку АТП здійснює обмін даними з персональнім комп’ютером через універсальну послідовну шину (USB); отримання теплового зображення об'єктів на моніторі ПК а також управління роботою відеоблока здійснюється через інтерфейс користувача оригінального програмного забезпечення, що створено на мові DELPHI під операційну систему Microsoft Windows. При розробці програмного забезпечення використовується модульний принцип побудови програмного коду. Це дозволяє порівняно легко розширювати або змінювати набір функцій для користувача інтерфейсу в залежності від напрямку і конкретних завдань теплової діагностики.

Інтерфейс користувача програмного забезпечення ПК має широкий набір основних функцій:

- візуалізацію теплового зображення в реальному часі;
- вимір абсолютної температури в будь-якій точці чи області;
- можливість вибору різних колірних палітр;
- автоматичну установку динамічного діапазону;
- можливість усереднення теплового зображення по декількох кадрам (підвищення якості);

- вимір у будь-якій точці термограми перевищення температури над завданою;
- поліпшення якості теплового зображення за допомогою декількох варіантів фільтрації;
- побудову термопрофілів в будь-якій позиції;
- побудову ізотерм;
- маркірування і визначення площі області, температура якої більше (менше, дорівнює) заданої;
- автоматичне визначення максимальної, середньої і мінімальної температур усієї термограми чи виділеного фрагмента;
- можливість швидкого перегляду записаних термограм при працюючій камері;
- можливість запису і зберігання окремих термограм або динамічного термографічного фільму тощо

На рисунку 3.1 приведена головна сторінка інтерфейсу користувача програмного забезпечення АТП при роботі з ПК.

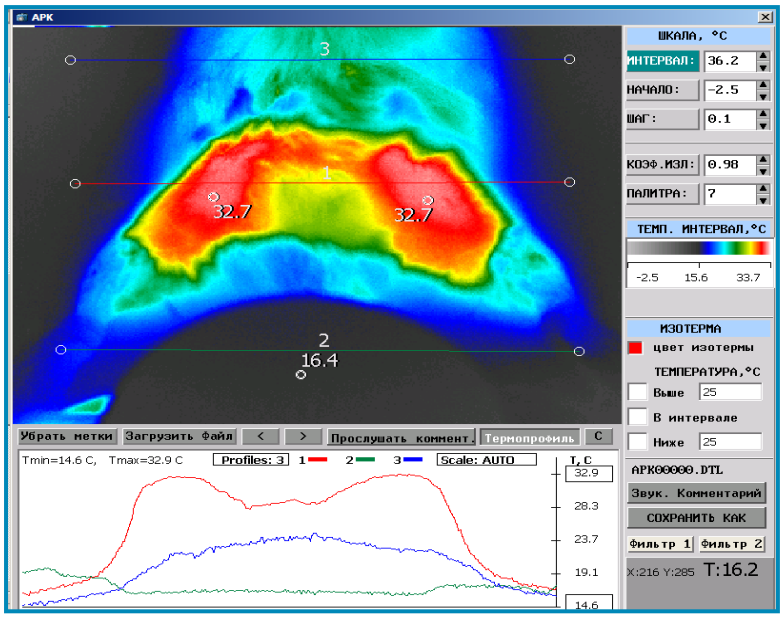


Рисунок 3.1 – Головна сторінка інтерфейсу користувача варіанту конструкції АТП при роботі з зовнішнім ПК

Також передбачено використання АТП з кишеньковим персональним комп’ютером (КПК), який постійно закріплено у закритому положенні на корпусі АТП і легко відкривається за допомогою шарніру (див. рис. 2.13).

У цьому випадку управління відеоблоком здійснюється через інтерфейс користувача оригінального програмного забезпечення, розробленого на мові PPL (Pocket Programming Language) під операційну систему Windows Mobile.

При роботі аналізатора спільно з КПК (для даної моделі було обрано модель Fujitsu Siemens Pocket Loox C550 з інтегрованим USB хост-контролером) програмне забезпечення має істотно менші можливості. Це пов'язано, в першу чергу, з зручністю управління, оскільки вибір функцій здійснюється тільки за допомогою чотирьох кнопок навігатора КПК. Тим не менш, сумісність форматів збережених файлів термограм дозволяє виробляти подальшу обробку теплових зображень засобами програмного забезпечення для ПК, що має суттєво більший набір функцій (дивись вище). Інтерфейс користувача КПК Software package має основні функції:

- візуалізацію теплового зображення об'єктів у реальному часі;
- індикацію абсолютної температури в будь-якій точці теплового зображення;
- зміна активної кольорової палітри;
- ручне або автоматичне керування яскравістю та контрастністю про зображення;
- індикацію мінімальної та максимальної температури;
- збереження окремих термограм або динамічного фільму на Memory Card;
- запис і відтворення голосового коментарю;
- швидкий перегляд збережених термограм тощо.

Інтерфейс користувача створеного оригінального програмного забезпечення для варіанту роботи АТП з КПК наведено на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Інтерфейс створеного програмного забезпечення для КПК.

У Додатку А приведено фрагмент тексту програми до АТП, створений на мові DELPHI для управління роботою відео блока. Відповідно до завдання на переддипломну практику мною було створено програмний модуль (фрагмент програми, що виділено червоним кольором), що здійснює цифрову фільтрацію теплового зображення. Модуль реалізує алгоритм медіанного цифрового фільтру, у якому кожен елемент зображення розраховується як середньо арифметичне значення сусідніх елементів, що складають матрицю 3x3 елемента.

ВИСНОВКИ

В результаті науково-технічної роботи протягом дипломної практики було розроблено оригінальний апаратно-програмний комплекс - аналізатор теплових полів (АТП) на базі одноелементного фотоприймача, що охолоджується до температури рідкого азоту. Завдяки модульній конструкції апаратної та програмної частин АТП здатний одночасно вирішувати як стандартні, так і різнопланові нетипові (наукові або медичні) задачі тепловізійного аналізу. При розробці АТП було виконано:

- визначені вимоги до АТП та розроблено його функціональну схему;
- розроблено окремі вузли АТП;
- виготовлено усі блоки та вузли АТП;
- створено оригінальне програмне забезпечення;
- здійснено збірку діючої моделі АТП та проведено лабораторні іспити.

Ця науково-технічна робота є продовженням на новому, більш високому, рівні науково-технічної роботи, яку автор зробив протягом курсовій роботі бакалавра, - розробив фотоприймальний пристрій АТП.

Протягом дипломної практики магістра автор приймав участь в усіх етапах розробки інших блоків АТП, знайомився з процесами їх виготовлення. Автор самостійно розробив функціональну схему всього приладу та прийняв участь у розробці системи сканування, збірці приладу та створенні програмного забезпечення. Для цього він ознайомився з достатньою кількістю літературних джерел за тематикою диплому, оволодів програмами AutoCAD (для створення відповідних креслень), P-CAD (для проектування друкованих плат), мовою програмування Delphi (для участі в створенні програмного забезпечення). Автор оволодів навиками роботи з АТП, кількісної обробки теплових зображень та отримав наукові та технічні знання по розробці та використанні тепловізійної техніки і навики з різноманітних технологічних процесів.

Автор прийняв участь у тепловізійному дослідженні низькотемпературних теплових полів при кріовпливі на біологічні об’єкти, в результаті чого став співавтором публікації: E.Yu. Gordiyenko, G.V. Shustakova, P.S. Bondar et al. «Infrared Camera to Monitor Low-Temperature Field Dynamics» // Collection of scientific articles of 4 International Scientific and Practical Conference «Information Systems and Technologies in Medicine» (ISM–2021), November 26–27, 2021 (Текст публікації додається).

Розроблений за участю автора аналізатор теплових полів має широкі перспективи практичного використання у наукових та біологічних дослідженнях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Компанія “NEC Infrared Technologies” [Електронний ресурс]: http://www.nec-infrared.ru/about.html
2. Компанія “Fluke Corporation” [Електронний ресурс]: http://www.fluke.com/
3. Компанія “FLIR Systems” [Електронний ресурс]: http://www.flir.com/
4. Компанії “TESTO, Inc.” [Електронний ресурс]: http://www.testo.us/
5. Глущук Н.И. Применение тепловизионных методов в научных исследованиях / Н.И. Глущук, Э.Ю. Гордиенко, Ю.В. Фоменко, Г.В . Шустакова // Наука и инновации. – 2013. - т.9, №2. – С.41- 46.
6. Yefremenko V. A Broadband imaging system for research applications / V. Yefremenko, E. Gordiyenko, G. Shustakova et al. // Review of Scientific Instruments. - 2009. - V.80. - P.056104.
7. Шустакова Г.В. Тепловизионный комплекс «ТК-1»/ Г.В. Шустакова // Мир техники и технологий. - 2006. - №2. - С.50 – 51.
8. Гордиенко Э.Ю. Многоэлементный тепловизор на основе неохлаждаемой болометрической матрицы / Э.Ю.Гордиенко, Н.И.Глущук, Ю.Я. Пушкарь и др. // ПТЭ. – 2012. - №4. - С.85-88
9. Гордиенко Э.Ю. ВТСП преобразователь теплового изображения / Э. Ю. Гордиенко, Г. В. Шустакова, Ю. В. Фоменко, Н. И. Глущук // ПТЭ. – 2013. - № 4. – С.125-131
10. Сизов Ф.Ф. Багатоелементний тепловізор з високою температурною чутливістю та телевізійною частотою кадрів / Ф.Ф. Сизов, О.В. Бехтір, Е.О. Білевич, та ін. // Наука та іновації. - 2005. - Т.1, № 3. - С.22.
11. Бондар П.С. Розробка фотоприймального пристрою для тепловизора / П.С. Бондар // Курсова робота. Архів ХНУ ім. В.Н. Каразіна. - 2020.
12. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 8.619-2006. [Електронний ресурс]: https://docs.cntd.ru/document/1200046163

13. Сизов Ф.Ф. Фотоэлектроника для систем видения в «невидимых участках спектра / Ф.Ф.Сизов. – Киев: Академпериодика. - 2008. - 460 с.
14. Госсорг Ж. Инфракрасная термография (Основы, техника, применение) / Ж. Госсорг. - М: Мир. – 1988. – 400 с.
15. Хадсон Р. Инфракрасные системы / Р. Хадсон - М: Мир. - 1972. – 534 с
16. Шустакова Г.В. Термографы ФТИНТ НАН Украины: медицинский аспект / Г. В. Шустакова, Ю.А.Винник, Г.С. Ефимова и др. // Лучевая диагностика. Лучевая терапия. – 2013. - №1. – С.27-33
17. Тепловизорі на охлаждаемой матрице. [Електронний ресурс]: https://technogenezis.ru/teplovizory/
18. Мельников Г.С., Самков В.М., Солдатов Ю.И., Коротаев В.В. Современные медицинские тепловизоры. // Г.С. Мельников, В.М. Самков, Ю.И.Солдатов, В.В. Коротаев // Материалы IX Междунар. конф. "Прикладная оптика - 2010". СПб. - 2010. - Т. 3. - С. 11-17.
19. Хижняк Л.Н. Диагностические возможности матричной инфракрасной термографии. Проблемы и перспективы / Л.Н. Хижняк, Е.П. Хижняк, Г.Р. Иваницкий // Весник новых медицинских технологий. – 2012 – Т. XIX, № 4. – С. 170
20. Глущук Н.И. Результаты исследования аномальных тепловых полей человека при облучении / Н.И. Глущук, Э.Ю. Гордиенко, Ю.В. Фоменко и др. // Наука и инновации. – 2017. - 13(2). – С. 48 - 58.
21. Гордиенко Э.Ю. Диагностика композитных материалов элементов самолетов методом активной термографии / Э.Ю. Гордиенко, Н.И. Глущук, Ю.В. Фоменко и др. // Nauka innov. – 2018 - 14 (2). - С.39-50
22. Аброськин Н.С. Анализ современных средств тепловизионного исследования./ Н.С. Аброськин, Е.А. Данилова, Н.Г. Жумашев // Современные информационные технологии. - 2017. - № 26 . - С. 39-45
23. Михеев С.В. Основы инфракрасной техники / С.В. Михеев. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО. – 2017. -128 с.

24. Шеннон Р. Проектирование оптических систем / Р.Шеннон, Дж.Вайант. - М: Мир. – 1983. - 430 с.
25. Ллойд Дж. Системы тепловидения. / Дж. Ллойд. - М: Мир. - 1978. - 415 с.
26. Тымкул В.М. Введение в оптотехніку / В. М. Тымкул, Л. В. Тымкул. // Новосибирск: СГУГиТ. - 2016. - 71 с.
27. Сайт компанії “Иртис” [Електронний ресурс]: http://www.irtis.ru/
28. Торшина И.П. Выбор приемника излучения при проектировании оптико-электронного прибора / И.П. Торшина, Ю.Г. Якушенков. Москва: Издательство МИИГАиК. – 2017. - 58 с.
29. Малков М.П.. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков. - М: Энергия. – 1973. - 392 с.
30. Сайт компанії “Judson Technologies”, [Електронний ресурс]: http://judsontechnologies.com/
31. Сайт компанії «Oxford Instrument», [Електронний ресурс]: http://www.oxford-instruments.com/
32. Гордиенко Э.Ю. Высокотемпературные сверхпроводниковые микротермометры для многоэлементных приемников ИК излучения / Э.Ю. Гордиенко, Н.И. Слипченко, А.С. Гарбуз // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – №3. – С. 38−41.
33. Воронкова Е.М. Оптические материалы для инфракрасной техники. / Е.М. Воронкова, Б.Н. Гречушников, Г.И. Дистлекр, И.П. Петров - М: Наука. - 1965. – 335 с.
34. Blackbody calculator [Електронний ресурс]: https://www.spectralcalc.com/blackbody/blackbody.php
35. Богомолов П.А. Приемные устройства ИК систем / П.А. Богомолов, В.И. Сидоров, И.Ф. Усольцев. – М.: «Радио и связь». – 1987. – 208 с.
36. Gordiyenko E. Infrared camera to monitor low-temperature thermal field dynamics / E. Gordiyenko, G. Shustakova, P. Bondar et al / Collection of scientific articles of 4 International Scientific and Practical Conference «Information Systems and Technologies in Medicine» (ISM–2021), November 26–27, 2021.

Додаток А

ФРАГМЕНТ ТЕКСТУ ПРОГРАМИ ДЛЯ АТП

```
unit Main;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, Buttons, ExtCtrls, ComCtrls, Menus, ToolWin, Mask, Spin, Gauges,
  printers;
//
  private
    { Private declarations }
    {
********************************************************************** }
    procedure RefreshScreen;
    procedure RefreshStatistics;
    procedure SetPalette;
    procedure DrawRectangleTemperature(x,y:Integer);
    procedure Screen;
    procedure ScreenSpeed;
    procedure Screen8;
    procedure Screen16;
    procedure Screen24;
//    procedure Screen32;
    procedure ScreenUniversal;
    procedure ClearClipBitmap;
    procedure LoadDTL(FileName:string);
    procedure SaveDTL(FileName:string);
    procedure AutoSearchTemperature;
    procedure SetContrast;
    function GetPointLosses(ADC:word):Single;
    function GetPointArea:Single;
    {
********************************************************************** }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  fmCryonic: TfmCryonic;
  isocol: array[1..3] of integer;
```

```
implementation

uses Clipbrd, Math, AboutBox, FileAccs, UnitColor, D2XXUnit;

{$R *.DFM}

const
    MaxPorts =4;
    line_y=256; { размер массива 0..255,0..256 }
    line_x=255;
    alfaX=1.667E-3; { мгновенные углы зрения , радианы }
    alfaY=1.5E-3;
    prof_id: integer = 1; {номер профиля}
    prof: integer = 1;
type
    TPalette=record Red,Green,Blue:byte end;
    TNamePalette=(GreyScale,Medic,Brawn,Contrast,F6,F7,F8,F9,F10,F11,
                  Inversion,BlackBody,BWContrast);

TCaseCopyToClipboard=(Nothing,Picture3D,Sechenie,TemperatureLine,Temperat
ureLineProf,
                      FullStatistics,PaletteBar,MainStatistics,CommonArea,
                      CloseArea, Commentary,Histogram,PaletteLosses);
    { при инициализации автоматически будет Nothing }
var
 PortStatus : FT_Result;
 Overscan_Timer_Count : byte;
 DevicePresent : Boolean;
 QueueTimerStatus : Boolean;
 Selected_Device_Serial_Number : String;
 Selected_Device_Description : String;
 TempBuffer : array[0..65535] of word; //Dobavil
EDIK!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
 BufferCount : integer;               // Dobavil
Edik!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!


    ImgBitmap:TBitmap;      { битовая матрица для кадра }
    ClipBitmap:TBitmap;     { битовая матрица для временных буферов }
    {i,j,}maxx,maxy:Integer;
    pic,pic1,pic2,pic3:
     array[0..line_y,0..line_x] of word;{ макс. номер строки, столбца}
    TemperaturePosition,SizeInterval:Integer;
    absorbtivity,kx,ky:Single;
    palette:array[0..4095] of TPalette;
```

```
    colors:array[0..4095] of TPalette;
    ColorsPalette:array[0..4095] of Integer;
    mx,my:Integer;
    InversionFlag:boolean;
    IntegerValue:Integer;
    SingleValue:Single;
{    ByteValue:byte;}
{    WordValue:word;}
    PrintLine:string;
    horizontal:Integer;
    vertical:array[0..370] of byte;
    Distance:Single;
    WorkPribor:boolean;
    DateTimeVariable:TDateTime;
    DrawLine,DrawRectangle,DrawFigure:boolean;
    Point1,Point2{,PointVariable}:TPoint;
    PaletteEnabled:boolean;
    StopPribor,SaveFrame:boolean;
    NumberSaveDTL:Integer; { номер кадра фильма }
    NumBitsPixel:Integer; { кол-во бит на пиксел для данного видеорежима }
    CaseCopyToClipboard:TCaseCopyToClipboard;
    SearchRec:TSearchRec;
    NumberSearchFile:Integer;
    Phase,Drift:Integer;
    LengthDrawLineX,LengthDrawLineY:Integer; { длина линии на кадре в
пикселах экрана }
    LastMouseX,LastMouseY:Integer;
    BevelHeightOld:Integer;
    HorizontalAngle,VerticalAngle,TempWind:Integer;
    VelocityWind:Single;
    MultiFrame:byte;
    MultiFrameActive:boolean;
    TIntro:Single;
    TauIntro:Single;
    TExtro:Single;
    AlfaExtro:Single;
    TauExtro:Single;
    SplitTemperature:Single;
    ADC:Word;

var
    Pix_Color:Word;
    l,h,N_Line:byte;
```

```
function GetCurrentDateTime: TDateTime;
var
  SystemTime: TSystemTime;
begin
  GetLocalTime(SystemTime);
  Result := SystemTimeToDateTime(SystemTime);
end;

function GetTemperature(ADC:word):Single;
var
   Temp:Extended;
   InternalThermometer:Word;
begin
InternalThermometer:=pic[maxy+1][50];
{ Tx^4=((ADC-512)+ k2*To^4))/k1 }

Temp:=((ADC-512)+ 9.11868E-8*
(-0.06*InternalThermometer+196.063+273.16)*
(-0.06*InternalThermometer+196.063+273.16)*
(-0.06*InternalThermometer+196.063+273.16)*
(-0.06*InternalThermometer+196.063+273.16))/9.07545E-8;

if Temp/10>=300000000 then
  Result:=SQRT(SQRT(temp/absorbtivity))-273.16+Drift
                  else Result:=-40;
end;

function SetTemperature(Temp:single):word;
var
   {Temp:Extended;}
   InternalThermometer:Word;
begin
InternalThermometer:=pic[maxy+1][50];
{ Tx^4=(Ax+k2*Tш^4)/k2 и k2}

Result := Round(512 + SQR(SQR(Temp-Drift+273.16))*absorbtivity*9.07545E-8 -
SQR(SQR(-0.06*InternalThermometer + 196.063 + 273.16))*9.11868E-8);
end;

function TfmCryonic.GetPointLosses(ADC:word):Single;
begin
TauExtro:=GetTemperature(ADC);//+273.16;
Result:=AlfaExtro*
(TauExtro-TExtro)*
```

```
GetPointArea
end;

function TfmCryonic.GetPointArea:Single;
begin
result:=alfaX*alfaY*Distance*Distance/
      Sin(HorizontalAngle*Pi/180)/Sin(VerticalAngle*Pi/180)
end;

procedure TfmCryonic.RefreshScreen;
begin
PaintBox1.canvas.copyRect(rect(0,0,mx,my),ImgBitmap.canvas,rect(0,0,mx,my));
PaintBox1.canvas.brush.color:=clMenu; { Закраска выступающих цифр }
PaintBox1.canvas.fillrect(rect(0,my,mx,370));
PaintBox1.canvas.fillrect(rect(mx,0,336,370));
end;

procedure TfmCryonic.ClearClipBitmap;
begin
{ заполнение буфера белым цветом }
ClipBitmap.canvas.brush.color:=clWhite;
ClipBitmap.canvas.fillrect(Rect(0,0,ClipBitmap.Width,ClipBitmap.Height));
end;

procedure TfmCryonic.RefreshStatistics;
var MaxTemperature,MinTemperature:word;
   i,j : integer;
begin
MaxTemperature:=0;
MinTemperature:=4095;
for i:=5 to maxx-5 do
for j:=5 to maxy-5 do
 begin
 if MaxTemperature<pic[j][i] then MaxTemperature:=pic[j][i];
 if MinTemperature>pic[j][i] then MinTemperature:=pic[j][i];
 end;
Label2.Caption:=FloatToStrF(GetTemperature(MaxTemperature),ffFixed,4,1);
Label3.Caption:=FloatToStrF(GetTemperature(MinTemperature),ffFixed,4,1);

label8.Caption:=label2.Caption;
label9.Caption:=label3.Caption;

end;
```

```
procedure TfmCryonic.Screen;
begin
SpeedButton4.Enabled:=false;
mx:=round(maxx/kx);
my:=round(maxy/ky);
if mx>336 then mx:=336;
if my>336 then my:=336;
if NumBitsPixel=16 then begin
                    Screen16
                    end
                 else
if NumBitsPixel=24 then begin
                    Screen24
                    end
                 else
if PaletteEnabled then begin
                    Screen8;
                    Exit
                    end
//                  else  { 32-битный цвет, надо проверить }
//if NumBitsPixel=32 then begin
//                      Screen32
//                      end
                else
                   begin
                   ScreenUniversal;
                   Exit;
                   end;
//PaintBox1.canvas.Draw(0,0,ImgBitmap);
PaintBox1.canvas.copyRect(rect(0,0,mx,my),ImgBitmap.canvas,rect(0,0,mx,my));
PaintBox1.canvas.brush.color:=clMenu;
{ FillRect границы прямоугольника не закрашивает }
PaintBox1.canvas.fillrect(rect(0,my,mx,370));
PaintBox1.canvas.fillrect(rect(mx,0,336,370));
SpeedButton4.Enabled:=true;
end;   { Screen }

procedure TfmCryonic.Screen8;
var
  point:word;
  i,j:Integer;
begin
if WorkPribor then begin
                ScreenSpeed;
```

```
                Exit;
                end;
for j:=0 to my do vertical[j]:=trunc(j*ky);
for i:=0 to mx do
 begin
  horizontal:=trunc(i*kx);
  for j:=0 to my do
   begin
   point:=pic[vertical[j]][horizontal];
   ImgBitmap.canvas.pixels[i,j]:=PaletteIndex(colorsPalette[point]+100);
  end;
 end;
//PaintBox1.canvas.Draw(0,0,ImgBitmap);
PaintBox1.canvas.copyRect(rect(0,0,mx,my),ImgBitmap.canvas,rect(0,0,mx,my));
PaintBox1.canvas.brush.color:=clMenu;
PaintBox1.canvas.fillrect(rect(0,my,mx,370));
PaintBox1.canvas.fillrect(rect(mx,0,336,370));
SpeedButton4.Enabled:=true;
end;   { Screen8 }

procedure TfmCryonic.Screen16;
var
   point:word;
   PointerBitmap:PWordArray;
   horizontal:array[0..336] of Integer;
   vertical:Integer;
   i,j:Integer;
begin
for i:=0 to mx do horizontal[i]:={trunc}round(i*kx);
for j:=0 to my do
 begin
  vertical:={trunc}round(j*ky);
  PointerBitmap:=ImgBitmap.ScanLine[j];
  for i:=0 to mx do
   begin
   point:=pic[vertical][horizontal[i]];
   { по 5 бит на каждый цвет, 16-й бит не используется }
   PointerBitmap[i]:=(colors[point].red div 8)*1024
                  +(colors[point].green div 8)*32
                   +colors[point].blue div 8;
  end;
 end;
end;   { Screen16 }
```

```
procedure TfmCryonic.ScreenUniversal;
var
   Point:word;
   i,j:Integer;
begin
if WorkPribor then begin
                ScreenSpeed;
                Exit;
                end;
for j:=0 to my do vertical[j]:=trunc{round}(j*ky);
for i:=0 to mx do
 begin
  horizontal:=trunc{round}(i*kx);
  for j:=0 to my do
   begin
   point:=pic[vertical[j]][horizontal];
   ImgBitmap.canvas.pixels[i,j]:=PaletteRGB(colors[point].red,
                                colors[point].green,
                                colors[point].blue);
   end;
 end;
PaintBox1.canvas.copyRect(rect(0,0,mx,my),ImgBitmap.canvas,rect(0,0,mx,my));
PaintBox1.canvas.brush.color:=clMenu;
PaintBox1.canvas.fillrect(rect(0,my-1,mx+1,370));
PaintBox1.canvas.fillrect(rect(mx,0,336,370));
end;   { ScreenUniversal }

procedure TfmCryonic.ScreenSpeed;
var
   point:word;
   mx,my:Integer;
   i,j:Integer;
begin
if PaletteEnabled then
     begin
     mx:=maxx;// div 2;
     my:=maxy div 4;
     //for j:=0 to my do vertical[j]:=j*2;
     for i:=0 to mx do
      begin
      //horizontal:=i*2;
      for j:=0 to my do
        begin
        ImgBitmap.canvas.pixels[i,5*j]:=
```

```
            PaletteIndex(colorsPalette[pic[4*j][{2*}i]]+100);
       end;
     end;
    PaintBox1.canvas.copyRect(rect(0,0,300,370{mx,my}),
                    ImgBitmap.canvas,rect(0,0,300,370{mx,my}));
    end
             else
    begin
    mx:=maxx div 2;
    my:=maxy div 2;
    //for j:=0 to my do vertical[j]:=j*2;
    for i:=0 to mx do
     begin
     //  horizontal:=i*2;
     for j:=0 to my do
      begin
      point:=pic[2*j][2*i];//pic[vertical[j]][horizontal];
      ImgBitmap.canvas.pixels[i,j]:={Palette}RGB(colors[point].red,
                              colors[point].green,
                              colors[point].blue);
      end;
     end;
    PaintBox1.canvas.copyRect(rect(0,0,250{297{mx},369{my}),
    ImgBitmap.canvas,rect(0,0,mx,my));
    {PaintBox1.canvas.brush.color:=clMenu;
    PaintBox1.canvas.fillrect(rect(0,my-1,mx+1,370));
    PaintBox1.canvas.fillrect(rect(mx,0,336,370));}
end;
end;

procedure TfmCryonic.Button21Click(Sender: TObject);
const
    Window=3;
    HalfWindow=Window div 2;
var
  i,j,i2,j2,Sum:Integer;
  Average,Min:Single;
  NearTemp:Word;
begin
NearTemp := 0;
{ медианный фильтр: }
{ центральный элемент матрицы приравниваем элементу, который   }
{ наиболее близок к среднему арифметическому из всех элементов }
for j:=1+HalfWindow to maxy-HalfWindow do
```

```
for i:=HalfWindow to maxy-HalfWindow do
  begin
  Sum:=0;
  for j2:=j-HalfWindow to j+HalfWindow do
  for i2:=i-HalfWindow to i+HalfWindow do
   Sum:=Sum+pic[j2][i2];
  Average:=Sum/(Window*Window);
  Min:=999;
  for j2:=j-HalfWindow to j+HalfWindow do
  for i2:=i-HalfWindow to i+HalfWindow do
   begin
   if Abs(Average-pic[j2][i2])<Min then
     begin
     Min:=Abs(Average-pic[j2][i2]);
     NearTemp:=pic[j2][i2];
     end;
    end;
  pic[j][i]:=NearTemp
  end;
Screen
end;

procedure TfmCryonic.SetContrast;
Label ContrastPalette;
var    i:Integer;
begin
if InversionFlag then SpeedButton1.Down:=true
              else SpeedButton1.Down:=false;
if PaletteEnabled then GoTo ContrastPalette;
if not InversionFlag then
 begin
 for i:=0 to TemperaturePosition-1 do
 begin colors[i].red:=0; colors[i].green:=0; colors[i].blue:=0 end;
 for i:=TemperaturePosition+sizeInterval to 4095 do
 begin colors[i].red:=255; colors[i].green:=255; colors[i].blue:=255 end;
 end
                  else
 begin
 for i:=0 to TemperaturePosition-1 do
 begin colors[i].red:=255; colors[i].green:=255; colors[i].blue:=255 end;
 for i:=TemperaturePosition+sizeInterval to 4095 do
 begin colors[i].red:=0; colors[i].green:=0; colors[i].blue:=0 end;
 end;
```

```
for i:=TemperaturePosition to TemperaturePosition+sizeInterval-1 do
 begin
 colors[i]:=palette[(i-TemperaturePosition)*4096 div sizeInterval];
 end;
Exit;
ContrastPalette:
if not InversionFlag then
 begin
 for i:=0 to TemperaturePosition-1 do colorsPalette[i]:=0;
 for i:=TemperaturePosition+sizeInterval to 4095 do colorsPalette[i]:=127;
 end
                else
 begin
 for i:=0 to TemperaturePosition-1 do colorsPalette[i]:=127;
 for i:=TemperaturePosition+sizeInterval to 4095 do colorsPalette[i]:=0;
 end;
if Not InversionFlag then
for i:=TemperaturePosition to TemperaturePosition+sizeInterval-1 do
 colorsPalette[i]:={100+}(i-TemperaturePosition)*128 div SizeInterval
                else
for i:=TemperaturePosition to TemperaturePosition+sizeInterval-1 do
 colorsPalette[i]:={100+}127-(i-TemperaturePosition)*128 div SizeInterval;
end;

(*
Формула расчета температуры:
 Tx^4 = (Ax+k2*Tш^4)/k2 , где k2=1E-8 [K]

Температура шторки:
 Tш = -0.0631*Aш+59.44+273.16 [K] , где Aш = pic[maxy+1][50]
```

Теплопотери элемента стены (вариант 1):
q = (a(Тстены-Твозд)+4*s*T^3*(Тстены-Твозд)))*
alfaX*alfaY*Distance*Distance* { площадь видимого элемента }
2*Tan(HorizontalAngle*Pi/360)*Tan(VerticalAngle*Pi/360) [Вт],
где
a=5.6+4*Vветра [Вт/кв.м/К],
s - сигма (пост. Стефана - Больцмана = 5.67E-8),
HorizontalAngle,VerticalAngle - гор. и верт. углы между направлением
наблюдения и плоскостью стены
Distance - расстояние между камерой и стеной

Теплопотери элемента стены (вариант 2):
q = AlfaExtro*(TauExtro-TExtro)*
alfaX*alfaY*Distance*Distance*
/Sin(HorizontalAngle*2*Pi/360)/Sin(VerticalAngle*2*Pi/360)
//*2*Tan(HorizontalAngle*2*Pi/360)*Tan(VerticalAngle*2*Pi/360) [Вт],
где
TIntro,TExtro - темп. воздуха внутри и снаружи,
TauIntro,TauExtro - темп. стены внутри и снаружи,
коэфф. теплоотдачи: AlfaExtro=8.7*(TIntro-TauIntro)/(TauExtro-TExtro),
(Расчитывается один раз для всей стены по выбранным TauIntro и TauExtro.
Обычно находится в районе 20)

Мгновенные углы зрения:
alfaX=1.667E-3;
alfaY=1.5E-3
*)

Додаток Б

ПРИКЛАД АДАПТАЦІЇ АТП ПІД ЗАДАЧІ КРІОБІОЛОГІЇ

Нижче наведено приклад розрахунку та адаптації АТП (за участю автора) для вирішення унікального завдання – вимірювання динаміки низькотемпературного (до -188 °С) теплового поля. Такі поля виникають, зокрема, на поверхні біологічних об'єктів у процесі цільової кріогенної деструкції нашкірних новоутворень (знищення патологічної тканини низькими температурами). Кріохірургу вкрай важливо контролювати в реальному часі кріодеструкції динаміку розміру та температури зон заморожуючи і так звану зону некрозу (зону незворотної загибелі клітин). Дистанційний неінвазивний метод ІЧ термографії є перспективним для вирішення цього завдання, однак його використання обмежується недостатнім діапазоном вимірювання негативних температур серійними ІЧ-камерами (до -20 °С). Тому ми адаптували АТП для кількісного моніторингу динаміки низькотемпературних теплових полів на поверхні біологічного об'єкта. Блок-схема базової системи АТП (до адаптування), а також конструкція та опис роботи основних модулів наведено у розділі 2.

Вимірювання за допомогою термопари показали, що мінімальна температура шкіри під кріоаплікатором на основі рідкого азоту не опускалася нижче -188 °С (≈ 85 К). Т.ч. для проведення детальних досліджень динаміки теплових полів поблизу кріоаплікатору потрібно розширення діапазону вимірювальних негативних температур до цього значення.

Оцінимо вимоги до детектора випромінювання. Відповідно до закону Стефана-Больцмана [14], величина потоку, що випромінюється одиницею площі абсолютно-чорного тіла, охолодженого до температури Т = 85 К, в одиницю тілесного кута в даному напрямку (енергетична яскравість) становить:

$$R(\lambda, \mathrm{T}) = \sigma T^4/\pi \approx 0{,}94(\mathrm{Вт \cdot sr \cdot м^{-2}}), \qquad (Б1)$$

де $\sigma \approx 5.6686 \cdot 10^{-8}$ ($\mathrm{Вт \cdot м^{-2} \cdot К^{-4}}$) - постійна Стефана-Больцмана.

Відповідно до закону Вина [14], довжина хвилі, при якій спостерігається максимальне значення спектральної щільності потоку власного випромінювання λ_{max}, і абсолютна температура Т пов'язані залежністю: $\lambda_{max} \cdot T$ = 2897,82 (мкм·К) ≈ 2,898 · 10^{-3} (м·К). Звідки отримуємо, що максимум випромінюв*ання АЧТ при температурі Т = 85 К доводиться на довжину хвилі: $\lambda_{max} \approx 34$ мкм. На основне вікно прозорості атмосфери (8-14) мкм припадає лише невеликий «хвіст» цього випромінювання, величину якого можна оцінити, скориставшись спеціальними таблицями [14], або спеціальною програмою [34].

Тоді для спектрального діапазону (8-14) мкм: R(λ, T) ≈ 0.002 (Вт·sr·$м^{-2}$), проте з урахуванням сусіднього вікна прозорості (16 - 26) мкм спектральна потужність випромінювання збільшується до R(λ, T) = 0,1 (Вт·sr·$м^{-2}$) у спільному діапазоні вікна прозорості атмосфери (8 - 26) мкм. *(Розрахунок з урахуванням вікон прозорості атмосфери зроблено для загального випадку використання тепловізора. У даній задачі ми використовуємо тепловізор на відстані L ≈ 1 м від біологічного об'єкта, - при такій відстані поглинанням атмосфери можна знехтувати).*

Для вимірювання випромінювання у спектральному діапазоні (8 - 26) мкм можна використовувати неселективний тепловий приймач випромінювання (ВТНП болометр) у поєднанні із дзеркальним об'єктивом Кассегрена (див. таблицю 2.3). Однак цей приймач має низьку чутливість та недостатню швидкодію, також існує складність точної стабілізації його робочої точки на середині надпровідного переходу. Тому наш вибір упав на одноелементний КРТ детектор ($Hg_{0.9}Cd_{0.1}Te$), який має область спектральної чутливості до 26 мкм при робочій температурі 85 К. На відміну від ВТНП болометра для КРТ не потрібно точної стабілізації робочої точки.

Попередньо обраний детектор був розміщений у вакуумі в розбірному кріостаті азотного рівня охолодження з вхідним вікном з KRS-5, прозорим для випромінювання в спектральному діапазоні (0,5 – 60) мкм [14]. Робоча температура приймача 85 К досягалася розташуванням приймача у вакуумі на спеціальній П-подібній посадковій платформі з ослабленим тепловим зв'язком

з азотною склянкою. Попередньо виміряний шум обраного детектора U_n у смузі частот Δf = 50 кГц та середнє значення його вольт-ватної чутливості S = S(λ) дозволило оцінити NEP (потужність, еквівалентну шуму):

$$NEP = U_n/S \quad (Б2)$$

Підставляючи виміряні значення, отримуємо: NEP ≈ $1.8 \cdot 10^{-13}$ (Вт·Гц$^{-1/2}$). Це відповідає мінімальній потужності, яку детектор може виявити,

$$W_1 = NEP * (\Delta f)^{1/2} \mathrm{W}_1 \quad (Б3)$$

$W_1 = 1.8 \cdot 10^{-13} \cdot 2.24 \cdot 10^2 \approx 4.0 * 10^{-11}$(Вт).

З іншого боку, спектральний потік випромінювання, що збирається оптичною системою і потрапляє на приймач [35]:

$$W_2 = R(\lambda, \mathrm{T}) \cdot A_{вх} \cdot A_{пр}/\pi * F^2, \quad (Б4)$$

де R(λ, T) = 0,1 (Вт·sr·м$^{-2}$) – щільність випромінювання АЧТ з температурою T=85 К у спектральному діапазоні (8-26) мкм.

При використанні лінзового об'єктива базового АТП (див. розділ 2), що складається з 2-х змінних лінз германієвих з просвітлюючим покриттям ZnS, зі спектральним діапазоном пропускання (3-26) мкм:

$A_{вх}$ = 7,1 ·10^{-4} м^2 - ефективна площа вхідної зіниці об’єктива;

$A_{пр}$ = 1,6 · 10^{-9} м^2 - площа чутливого елемента при розмірі чутливого елемента (40 х 40) мкм;

F = 3·10^{-2} м - фокусна відстань об'єктива.

Тоді, підставивши всі параметри у (Б4), отримуємо:

$W_2 = 0.1 \cdot 7.1 \cdot 10^{-4} \cdot 1.6 \cdot 10^{-9}/(3.14 \cdot 9 * 10^{-4}) \approx 4.0 * 10^{-11}$(Вт).

Таким чином: $W_1 \approx W_2$. Отже, при використанні обраних детектора та об'єктива, ми можемо виявити випромінювання АЧТ з температурою не нижче 85 К.

Розбірний кріостат з вибраним приймачем був поміщений у базову модель АТП у поєднанні з дволінзовим об'єктивом. ІЧ-камера була випробувана в діапазоні температур (-30...+50) °С на метрологічному стенді Fluke Portable Infrared Calibrator-9133 (Fluke Corporation, США) на базі джерела ІЧ випромінювання з регульованою температурою. Точність вимірювання абсолютної температури ми оцінили як ±1 °С у діапазоні (-30...0) °С та ±0,5 °С у діапазоні (0...+50) °С. Для вимірювання низьких температур в діапазоні (-188...-30) °С калібрування ІЧ-камери проводилося за допомогою спеціально розробленої та виготовленої моделі АЧТ, що охолоджується рідким азотом, та термопари (контактного термометра) .

У базовій моделі АТП для зменшення похибки дистанційного вимірювання просторового розподілу абсолютної температури об'єктів, що досліджуються, на оптичній осі перед сканером розташовується модулятор теплового потоку, що являє собою металеву почорнену шторку з контрольованою температурою і високим коефіцієнт коефіцієнтом випромінювання (≈0,98). Т.ч. вимірювання температури об'єктів, що потрапляють у поле зору АТП, проводиться щодо еталонного випромінювача з відомими параметрами (температура, коефіцієнт випромінювання), див. розділ 2.

В адаптованому АТП-Кріо ми використовували шторку з напиленою алюмінієвою плівкою з коефіцієнтом відображення 95 % у широкому спектральному діапазоні (ІЧ дзеркало). Наприкінці кожного кадру (під час зворотного ходу дзеркала кадрової розгортки) поле зору системи повністю перекривається дзеркальною шторкою, і на детектор надходить лише потік випромінювання з поверхні шторки. Це дозволяє програмному забезпеченню приладу поставити у відповідність величині потоку випромінювання, що реєструється детектором, абсолютне значення температури 85 К. Іншими словами, вимірювання температури об'єктів, що потрапляють у поле зору системи, тепер проводиться відповідно еталонного дзеркального випромінювача з відомою температурою і коефіцієнтом випромінювання..

Крім зміни конструкції (дзеркальний модулятор) та параметрів приладу (діапазон вимірюваних температур), було повністю змінено інтерфейс користувача, а також були додані деякі програмні функції, у тому числі автоматичний запис масиву цифрових даних кожні 1.5 секунди протягом півгодини (термографічний фільм). Прилад було використано для дистанційного моніторингу динаміки теплового поля біологічних об'єктів з метою контролю в реальному часі кріодеструкція миттєвого розташування ізотерми первинного некрозу тканин [36]. Для кожного об’єкту знімався 0,5 годинний термографічний фільм, що дозволяє дистанційно в реальному часі контролювати теплові поля, що швидко змінюються при кріодеструкції, Кількісна обробка отриманих цифрових даних дозволяла в реальному часі контролювати розмір крижаної плями та області некрозу. На рисунку Б1 приведена термограма піддослідної тварини і тепловий перетин через 1 сек після припинення кріовпливу.

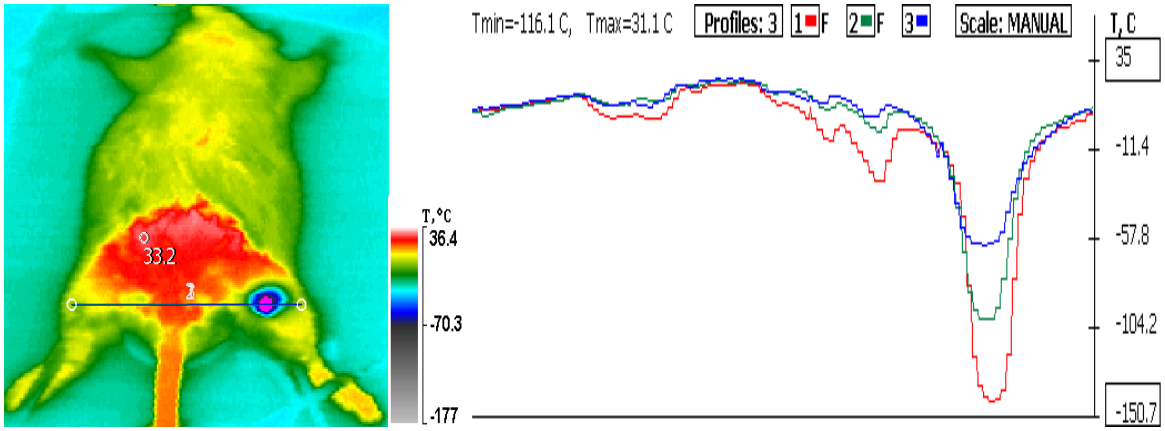


Рисунок Б1. Ліворуч термограма біологічного об’єкту (щура) при відігріванні після кріовпливу, праворуч - теплові перетини через область кріовпливу через 1, 10 і 20 с після припинення кріовпливу.