

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

Приладобудівний факультет

Кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

_____ Защепкіна Н.М.

«_» _____ 20__р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

на тему: «Вдосконалення вимірювання розмірів дефектних зон сонячних елементів застосуванням контурної фільтрації»

Виконав:

студент VI курсу, групи ПН-71мп Шуляк
Володимир Сергійович

Керівник:

к.т.н., ст. викладач Божко К.М.

Консультант з «Розроблення стартап-проекту»: к.е.н.,
доцент Бояринова К.О.

Рецензент:

д.т.н., проф. Бурау Н.І.

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

Студент _____

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

Факультет Приладобудівний

Кафедра Наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем

Освітній ступінь “магістр”

Галузь знань 15 - Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 - «Інформаційно-вимірювальні системи та технології екологічного моніторингу»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. завідувача кафедри

_____ Защепкіна Н.М.

«___» грудня 2018 р.

ІНДИВІДУАЛЬНИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ПЛАН

НА ДРУГИЙ РІК НАВЧАННЯ

МАГІСТРАНТА ШУЛЯКА ВОЛОДИМИРА СЕРГІЙОВИЧА

1. Тема дисертації «Вдосконалення вимірювання розмірів дефектних зон сонячних елементів застосуванням контурної фільтрації» затверджена наказом по університету від «___» _____ 2018 р. №_____
2. Термін здачі студентом оформленої дисертації «12» грудня 2018 р.
3. Об'єкт дослідження Об'єктом дослідження є процес виявлення та візуалізації дефектів сонячних елементів та їх вплив на експлуатаційні параметри і характеристики фотоелектричних сонячних батарей.
4. Предмет дослідження Предметом дослідження є метод контурної фільтрації зображень дефектних зон сонячних елементів, які були отримані при візуалізації теплового поля методом інфрачервоної термографії.
5. Перелік питань, які мають бути розроблені 5.1. Провести аналіз досліджень в області методів контурної фільтрації зображень як важливої складової

- цифрової обробки зображень та вимірювання їх геометричних розмірів. 5.2. Дослідити термографічні зображення дефектів фотоелектричних сонячних елементів і батарей, отриманих при протіканні через них зворотного темного струму і виділення тепла Джоуля, із застосуванням контурної фільтрації з метою зменшити похибку вимірювання геометричних розмірів дефектних зон. 5.3 Експериментально визначити основну енергетичну характеристику дефекту сонячного елемента – його теплову потужність. 5.4. Виконати аналіз похибок вимірювання геометричних розмірів телевізійною або термографічною камерою.
6. Перелік публікацій 6.1. Шуляк В.С. Теплове поле сонячного елемента при протіканні зворотного темного струму та його вольт-амперна характеристика /В.С. Шуляк, К.М. Божко //Збірник праць 14-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених у приладобудуванні. – 4-5 грудня 2018 р. – м. Київ. – С. 214-217. 6.2. Шуляк В.С. Контурна фільтрація у термографії сонячних елементів /Шуляк В.С., Божко К.М. //Матеріали 34-ої Міжнародної наукової інтернет-конференції "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення". – 11 грудня 2018 р. – м. Тернопіль. – 2с.
7. Перелік ілюстративного матеріалу 7.1. Структурна схема лабораторного стенду термографії сонячних елементів. 7.2. Структурна схема методів обробки термографічних зображень. 7.3. Алгоритм обробки термографічного зображення. 7.4. Алгоритм розрахунку теплової потужності дефекту сонячного елемента.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2018 р.

Науковий керівник _____ Божко К.М.

Завдання прийняв до виконання _____ Шуляк В.С.

1. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 4. Стартап проект «Удосконалення контролю результатів вимірювання оптичних показників цільного зерна пшениці»	Бояринова К.О., кандидат економічних наук, доцент		

2. Дата видачі завдання 6 вересня 2017р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Пояснення керівником завдання дипломної роботи	до 15.09.2018 р.	
2	Ознайомлення з літературою та посиланнями	до 01.10.2018 р.	
3	Початок виконання теоритичної частини дипломної роботи	до 15.10.2018 р.	
4	Підготовка та знаходження фотоматеріалів для аналізу	до 01.11.2018 р.	
5	Виконання дослідної частини дипломної роботи	до 15.11.2018 р.	
6	Оформлення дипломної роботи	до 01.12.2018 р.	
7	Фінальна перевірка керівником, на якість виконання та оформлення дипломної роботи	до 05.12.2018 р.	

Дата видачі

“___” вересня 2018р.

Науковий керівник

_____ Божко К.М.

Прийняв до виконання

_____ Шуляк В.С

ANNOTATION

Master's thesis "Improvement of measuring the size of defective zones of solar cells using contour filtration" Improving methods of air pollution control by device based on the phenomenon of surface plasmon resonance" framed in the form of an explanatory note containing 97 sheets, 4 tables and 51 illustrations.

The purpose of this work is to study the possibility of reducing the measurement error of defective zone sizes on images of photovoltaic solar cells obtained by infrared thermography using contour filtration.

Research tasks: 1) to study the methods of image processing with the allocation of contours; 2) to improve the method of thermographic control of defective zones of photovoltaic solar cells using contour filtration.

Research results can be used for thermographic control of solar batteries.

PHOTOELECTRIC SOLAR ELEMENT, PHOTOELECTRIC SOLAR BATTERY, INFRARED THERMOGRAPHY, CONTRAST FILTRATION.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація «Вдосконалення вимірювання розмірів дефектних зон сонячних елементів застосуванням контурної фільтрації» оформлена у вигляді пояснювальної записки, що містить 97 аркушів, 4 таблиці та 51 ілюстрація.

Метою роботи є дослідження можливості зменшити похибку вимірювання розмірів дефектних зон на зображеннях фотоелектричних сонячних елементів, отриманих методом інфрачервоної термографії, застосуванням контурної фільтрації.

Завдання досліджень: 1) дослідити методи обробки зображень із виділенням контурів; 2) вдосконалити метод термографічного контролю дефектних зон фотоелектричних сонячних елементів застосуванням контурної фільтрації.

Результати досліджень можуть бути використані при термографічному контролі сонячних батарей.

ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ СОНЯЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СОНЯЧНА БАТАРЕЯ, ІНФРАЧЕРВОНА ТЕРМОГРАФІЯ, КОНТУРНА ФІЛЬТРАЦІЯ.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АЧТ – абсолютно чорне тіло;
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
АЦП – аналого-цифрове перетворення;
БО – блок охолодження;
БС – блок сполучення;
ВАХ – вольт-амперна характеристика;
Д – дисплей;
ДЖ – джерело живлення;
ІЧО – інфрачервоний об'єктив;
ІЧТ – інфрачервона термографія;
КЕ – контрольний елемент;
КІХ – кінцева імпульсна характеристика;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
КФ – контурна фільтрація;
МП – мультиплексор;
НВД – напівпровідниковий діод;
ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій;
ОПВ – оптична передавальна функція;
ОС – оптична система;
ПЗЗ – поверхневий зарядовий зсув;
ПП – попередній підсилювач;
СЕ – сонячний елемент;
СТЗ – система технічного зору;
ТВС – телевізійна вимірювальна система;
ТІВС – телевізійна інформаційно-вимірювальна система;
ТГ – тактовий генератор;
Ф – фільтр;
ФЕП – фотоелектричний перетворювач;
ФЕСБ – фотоелектрична сонячна батарея;
ФП – фотоприймач;
ФРТ – функція розсіювання точки;
ФЧХ – фазо-частотна характеристика;

ЦАП – цифро-аналогове перетворення;

ЦП – центральний процесор.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ КОНТУРНОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ВИМІРЮВАННЯ ЇХ РОЗМІРІВ	14
1.1. Основні характеристики зображення	14
1.2. Системи обробки зображень	18
1.3. Виділення контурів зображень	25
1.4. Модель побудови зображення телевізійною або інфрачервоною камерою.....	29
1.5 Аналіз математичної моделі лінійного зсуву зображення, яке формує телевізійна вимірювальна система	33
Висновки до розділу 1	40
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФЕКТНИХ ЗОН СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І БАТАРЕЙ	40
2.1. Зв'язок між неоднорідністю теплового поля сонячного елемента та його коефіцієнтом корисної дії	40
2.2. Візуалізація «гарячих зон» методом інфрачервоної термографії	46
2.3. Вдосконалення алгоритму фільтрації зображень	52
2.4. Розрахунок теплової потужності дефектної зони	60
2.5. Аналіз похибок вимірювання геометричних розмірів зображень на прикладі електролюмінісцентних дефектів	64
2.6. Експериментальні дані з контурної фільтрації термографічних зображень.....	69
Висновки до розділу 2.....	80
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ВИМІРЮВАННЯ РОЗМІРІВ ДЕФЕКТНИХ ЗОН СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАСТОСУВАННЯМ КОНТУРНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ»	81
5.1 Опис ідеї проекту	81
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту	84
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	86
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	92
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	94
5.6 Висновки	96
ВИСНОВКИ.....	97

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	99
Додаток А. Структурна схема лабораторного стенду термографії сонячних елементів	107
Додаток Б. Алгоритм обробки термографічного зображення на основі методу Кенні	108

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Останнім часом світова сонячна енергетика розвивається у напрямку здешевлення як введеної нової потужності, так і виробленої електроенергії. У Німеччині станом на серпень 2018 року електроенергію, вироблену на сонячних електростанціях, купували за ціною 43,3 євроценти за кіловат-годину, а кіловат потужності коштував 1400 євро [1]. Зазначимо, що приблизно 90 відсотків сонячної електроенергії виробляють на основі використання кристалічного кремнію. Це технології так званої «першої хвилі» [2]. Технологічні ланцюжки наразі добре відпрацьовані на основі результатів наукових досліджень фотовольтаїки останніх десятиліть. Проте, підвищення коефіцієнту корисної дії (ККД) фотоелектричних сонячних батарей (ФЕСБ) або принаймні його збереження на заявленому рівні під час тривалого терміну їх експлуатації залишається нагальною проблемою. Явні і приховані дефекти різної природи притаманні кожному сонячному елементу і вони можуть суттєво впливати на процеси деградації сонячного елемента і, наприкінці, призводити до зменшення ККД на кілька відсотків (наприклад, з 14% до 10%, що є приводом до виведення ФЕСБ із експлуатації).

Дефекти сонячних елементів типу «гарячих зон» (Hot Spots) фундаментально досліджені методом інфрачервоної термографії (ІЧТ), зокрема, в роботах [3-6]. Мікро-дефектам кремнієвих сонячних елементів притаманна передпробійна електролюмінісценція, яку широко досліджують різними методами [7-12]. Мікро-дефекти особливої природи випромінюють видиме світло при протіканні через них зворотного струму. Механізм збудження і властивості цього явища досліджені лише в одній роботі [13] і потребують, на нашу думку, уточнень і проведення додаткових експериментів.

Виявлення дефектів сонячних елементів різної природи, їх візуалізація різними методами та засобами, вимірювання їх параметрів та оцінювання їх впливу на експлуатаційні параметри і характеристики як окремого сонячного елемента, так і батареї в цілому, складають проблематику наукових досліджень кафедри НАЕПС.

Вимірювання геометричних розмірів дефектних зон відбувається за результатами їх візуалізації методом ІЧТ та обробки отриманих зображень. Нами досліджується можливість застосування при цьому різних алгоритмів фільтрації,

зокрема, контурного фільтру. Контурна фільтрація (КФ) дозволяє зменшити похибку вимірювання геометричних розмірів дефектних зон. На основі даного вимірювання можливий більш точний розрахунок параметрів дефектної зони, зокрема, її теплової потужності. Це надасть об'єктивну інформацію про ступінь дефектності сонячного елемента та здатність ФЕСБ до подальшої експлуатації.

Результати досліджень можуть бути використані при виробництві ФЕСБ, а також при їх вихідному контролі та в режимі експлуатації.

Практична цінність даних досліджень полягає у використанні вдосконаленого методу та засобу отримання термограм в лабораторному практикумі для навчання студентів зі спеціальності 152 – «Метрологія та інформаціо-вимірювальна техніка».

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є зменшення похибок вимірювання геометричних розмірів дефектних зон сонячних елементів, які виявляються методом інфрачервоної термографії при нагріванні елементів зворотним темновим струмом, застосуванням контурної фільтрації.

Поставлена мета досягається шляхом вирішення таких наукових задач:

1. Аналіз методу інфрачервоної термографії контролю дефектів сонячних елементів;
2. Аналіз алгоритмів контурної фільтрації при вимірюванні геометричних розмірів зображень теплових полів;
3. Вдосконалення методу вимірювання геометричних розмірів зображення дефектної зони сонячного елемента застосуванням цифрового контурного фільтру;
4. Вдосконалення засобу збудження прихованих дефектів сонячних елементів на основі протікання через них зворотного темнового струму і виділення внаслідок цього додаткового тепла Джоуля шляхом стабілізації струму.
5. Уточнення розрахунку теплової потужності дефектної зони сонячного елемента на основі уточнених геометричних розмірів термографічного зображення зони дефекту;
6. Аналіз похибок вимірювання геометричних розмірів зображень, отриманих телевізійною камерою видимого або інфрачервоного діапазону.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процес виявлення та візуалізації дефектів сонячних елементів та їх вплив на експлуатаційні параметри і характеристики фотоелектричних сонячних батарей.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є метод контурної фільтрації зображень дефектних зон сонячних елементів, які були отримані при візуалізації теплового поля методом інфрачервоної термографії.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає в застосуванні контурної фільтрації термографічного зображення, яка дозволяє зменшити методичну похибку вимірювання геометричних розмірів дефектної зони сонячного елемента на 2% та похибку розрахунку теплової потужності дефекту на 3%.

Практична цінність. Практична цінність досліджень полягає у вдосконаленні лабораторного стенду термографічного контролю сонячних елементів впровадженням режиму стабілізації струму при їх нагріванні зворотним темновим струмом.

Апробація результатів. Апробація результатів дослідження відбулася на конференціях:

- 14-й Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених у приладобудуванні. – 4-5 грудня 2018 р. – м. Київ;
- 34-й Міжнародній науковій інтернет-конференції "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення". – 11 грудня 2018 р. – м. Тернопіль.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ КОНТУРНОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ВИМІРЮВАННЯ ЇХ РОЗМІРІВ

1.1. Основні характеристики зображення

Огляд методів цифрової обробки зображень взагалі і контурної фільтрації зокрема, виконуємо на основі джерел [14-16].

Інтенсивність.

Важливою характеристикою зображення є інтенсивність. Величина інтенсивності визначається значенням конкретної фізичної величини в залежності від природи зображення. Якщо зображення є джерелом власного або відбитого випромінювання (зображення на телевізійному екрані, фотографічне зображення), то в якості інтенсивності використовується яскравість, якщо є проміжним і призначене для подальшого перетворення (наприклад, за допомогою фотоприймача в електричний струм), – то для характеристики використовується освітленість.

Контраст.

Оскільки енергія випромінювання не може бути нескінченно великою, то існує верхня межа інтенсивності J_{max} , що визначає величину допустимої інтенсивності реального зображення. Часто в зображенні існує і нижня межа інтенсивності $J_{min} > 0$. В цьому випадку різниця $D_j = J_{max} - J_{min}$ визначає діапазон значень інтенсивності або амплітуд даного зображення. Амплітудою називається значення інтенсивності. Амплітуда J_{min} називається рівнем чорного в зображенні, амплітуда J_{max} - рівнем білого. Проміжні значення амплітуд утворюють півтони в зображенні (шкалу сірого). такі зображення називають півтоновими. Якщо зображення має два рівні - максимальне і мінімальне, то його називають бінарним.

Для характеристики відносної зміни півтонів в сусідніх точках використовують величину контрасту. Нехай інтенсивність зображення в точці (X_1, Y_1) становить $J_1 = J(X_1, Y_1)$, а в точці (X_2, Y_2) - $J_2 = J(X_2, Y_2)$, знайдемо J'

$$\max = \max(J_1, J_2) \text{ і } J'$$

$\min = \min(J_1, J_2)$, тоді за контраст приймається наступна величина:

$$K = \frac{J_{max} - J_{min}}{J_{max}} \quad (1.1)$$

Іноді замість контрасту використовується коефіцієнт модуляції:

$$K = \frac{J'_{max} - J'_{min}}{J'_{max} + J'_{min}} \quad (1.2)$$

Часто при аналізі конкретного зображення розглядається деякий об'єкт, що цікавить на навколишньому його тлі. Якщо середня за площею яскравість об'єкта задається величиною L_o , а фону – L_ϕ , то в якості контрасту і коефіцієнта модуляції приймаються значення:

$$K = (\bar{L}_o - \bar{L}_\phi) / \bar{L}_\phi \quad (1.3)$$

$$K = |(\bar{L}_o - \bar{L}_\phi)| / (\bar{L}_o + \bar{L}_\phi) \quad (1.4)$$

Чим вище контраст, тим помітніше об'єкт або цікавить деталь на навколишньому фоні. Слабо-контрастні зображення взагалі можуть не відрізнитися оком. Нижня межа контрасту, при якому око ще може розрізнити перепад яскравості на межі своєї чутливості, називається пороговим контрастом $K_{\text{пор}}$. У широкому діапазоні яскравості $K_{\text{пор}} = 0.02 - 0.05$. при дуже темному або, навпаки, яскравому фоні величина $K_{\text{пор}}$ збільшується, тобто для відмінностей деталей в зображення потрібно більший перепад яскравості.

Просторова частота.

Просторова частота характеризує частоту зміни яскравості. Вона визначається, як правило, кількістю коливань яскравості на одиницю довжини. Часто значення просторової частоти вимірюється в лініях або штрихах на міліметр, що показує скільки світлих і темних ділянок зображення з гармонійним розподілом інтенсивності укладається на 1мм довжини уздовж розглянутого напрямку. Чим вище просторова частота в зображенні, тим більше дрібну структуру воно має. Зображення чорно-білої шахівниці є прикладом зображення з високою просторовою частотою. Зображення хмар зазвичай містить низьку просторову частоту.

Амплітудно-частотна характеристика.

Будь-який періодичний сигнал можна розкласти в ряд Фур'є. При цьому він представляється у вигляді суми гармонійних функцій або комплексних експонент з частотами, що утворюють арифметичну прогресію. Для одновимірного сигналу розкладання в ряд Фур'є в речовій формі без врахування середнього значення інтенсивності можна записати:

$$J(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n \omega_1 x + \varphi_n) \quad (1.5)$$

Де A_n - величина амплітуди, а φ_n – фази

У комплексній формі розкладання в ряд Фур'є записується в такий спосіб

$$J(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{-jn\omega_1 x} \quad (1.6)$$

де

$$C_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} J(x) \exp(-jk\omega_1 x) dx \quad (1.7)$$

Комплексні коефіцієнти ряду пов'язані з амплітудами A_n і фазами φ_n наступними співвідношеннями:

$$A_n = 2|C_n|, \varphi_n = \arg(C_n) \quad (1.8)$$

Сукупність амплітуд гармонік ряду Фур'є називається амплітудним спектром або амплітудно-частотною характеристикою, а сукупність їх фаз - фазовим спектром або фазо-частотною характеристикою.

Для спектрального аналізу неперіодичних сигналів використовують перетворення Фур'є. Формула для розрахунку коефіцієнтів комплексного ряду Фур'є модифікується таким чином:

- частота стає безперервним параметром перетворення, тобто $k\omega$ у формулі замінюється на ω ;
- видаляється множник $1/T$;
- результатом обчислень замість коефіцієнтів ряду C_k є функція частоти $S(\omega)$ - спектральна функція (щільність) сигналу.

В результаті отримаємо формулу прямого перетворення Фур'є:

$$J(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} J(x) e^{-j\omega x} dx \quad (1.9)$$

Для обчислення зворотного перетворення Фур'є в формулі самого ряду Фур'є підсумовування замінюється інтегруванням і, крім того, перед інтегралом з'являється поділ на 2π :

$$J(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} J(\omega) e^{-j\omega x} d\omega \quad (1.10)$$

Якщо функція $J(x, y)$ описує розподіл енергії в просторі (в площині зображення), то амплітудно-частотних діапазонах $J(\omega_x, \omega_y)$ описує розподіл енергії по просторовим частотам. Чим більше амплітуди високочастотних гармонік, тим більше дрібну структуру має зображення.

Амплітудно-частотних діапазонах функції $J(x, y)$ представляється спектральною щільністю $J(\omega_x, \omega_y)$, отриманої за допомогою прямого перетворення Фур'є:

$$J(\omega_x, \omega_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J(x, y) e^{-j(\omega_x x + \omega_y y)} dx dy \quad (1.11)$$

Значення $(,)$ x у J ω ω зручніше висловлювати в полярних координатах:

$$J(\omega_x, \omega_y) = |J(\omega_x, \omega_y)| e^{-j\varphi(\omega_x, \omega_y)} \quad (1.12)$$

Де $|J(\omega_x, \omega_y)| = [R^2(\omega_x, \omega_y) + I^2(\omega_x, \omega_y)]^{1/2}$ - амплітудний спектр Фур'є-перетворення

Маючи спектральну щільність можна отримати зображення за допомогою зворотного перетворення Фур'є:

$$J(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J(\omega_x, \omega_y) e^{j(\omega_x x + \omega_y y)} d\omega_x d\omega_y. \quad (1.13)$$

Конттури.

Під контуром (краєм) розуміється та частина зображення, в якій інтенсивності змінюється швидко. Швидкість зміни інтенсивності $J(x, y)$ визначається першими похідними по координатам. У кожній точці зображення можна визначити напрямок, в якому збільшення інтенсивності відбувається з найбільшою швидкістю - градієнт функції $J(x, y)$. Градієнт є вектором, його модуль дорівнює найбільшою для даної точки швидкості збільшення інтенсивності:

$$\overrightarrow{grad}(J(x, y)) = \frac{dJ}{dx} \vec{i} + \frac{dJ}{dy} \vec{j} \quad (1.14)$$

$$|\overrightarrow{grad}(J(x, y))| = \sqrt{\left(\frac{dJ}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dJ}{dy}\right)^2}. \quad (1.15)$$

Шуми в зображенні.

Часто зображення містять не тільки корисну інформацію, а й різні перешкоди. Якщо такі перешкоди носять випадковий характер, то вони називаються шумами. Зашумлене зображення називається стохастичним. Розглянемо моделі адитивної, імпульсного і мультиплікативного шуму.

Модель адитивного шуму використовується, коли сигнал на виході системи і на проміжному етапі його перетворення розглядається як сума корисного сигналу і деякого випадкового сигналу. Так описують дію зернистості фотоплівки або флуктуаційний шум в радіосистеми.

Якщо дія шуму позначається не на всій протяжності сигналу, а тільки в випадково розташованих точках, де значення сигналу замінюється випадковою величиною, такий шум називається імпульсним. Такий шум зустрічається в системах передачі зображень по радіоканалах з використанням нелінійних видів

модуляції (наприклад, частотна), в цифрових системах передачі та зберігання зображення.

У мультиплікативній моделі шуму корисний сигнал множиться на випадковий сигнал. До такої моделі відноситься шум фотоелектронних помножувачів, дифузійний шум в голографічних зображувальних системах тощо.

1.2. Системи обробки зображень

Найважливішою класифікаційною ознакою систем обробки зображень є лінійність або нелінійність системи. Лінійними називаються системи, для якої виконується ознака суперпозиції: реакція на суму сигналів дорівнює сумі реакцій на ці сигнали, подані на вхід окремо. Системи можуть бути стаціонарні і нестаціонарні, що визначає сталості або мінливості їх характеристик в часі. Система називається стаціонарною (система з постійними параметрами), якщо довільна затримка подається на вхід сигналу призводить лише до такої ж затримки вихідного сигналу, не змінюючи його форми.

Способи опису лінійних систем.

Зв'язок між вхідними та вихідними сигналами лінійної ланцюга можна виразити у вигляді диференціального рівняння виду:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + a_{n-2} \frac{d^{n-2} y}{dt^{n-2}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + b_{m-2} \frac{d^{m-2} x}{dt^{m-2}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x(t) \quad (1.16)$$

тут $x(t)$ - вхідний сигнал, $y(t)$ - вихідний сигнал, a_i і b_i - постійні коефіцієнти. Таким чином, ланцюг описується набором коефіцієнтів a_i і b_i . Значення n називається порядком ланцюга.

Характеристики лінійних систем.

Імпульсна характеристика - це реакція системи на подану на вхід дельта-функцію. Дельта-функція або функція Дірака, являє собою нескінченно вузький імпульс з нескінченною амплітудою, розташований при нульовому значенні аргументу функції. «Площа» імпульсу дорівнює одиниці:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0, \\ \infty, & t = 0, \end{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1.17)$$

Дельта-функція має фільтрувальну властивість. Вона полягає в тому, що, якщо дельта-функція присутня під інтегралом в якості множника, то результат інтегрування дорівнюватиме значенням іншого підінтегрального виразу в тій точці, де зосереджений дельта-імпульс.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\delta(t - t_0) = f(t_0). \quad (1.18)$$

Будь-який сигнал може бути представлений у вигляді згортки самого себе з дельта-функцією:

$$S_{\text{вих}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{вх}}(t)h(t - t_0)dt \quad (1.19)$$

де $h(t-t_0)$ - імпульсна характеристика. Імпульсною характеристикою (імпульсним відгуком) для оптичних систем називається функція розсіювання точки (ФРТ).

Розглянемо структурну схему (Рис. 1.1) системи технічного зору (СТЗ) з вбудованою електронно-обчислювальною машиною (ЕОМ).

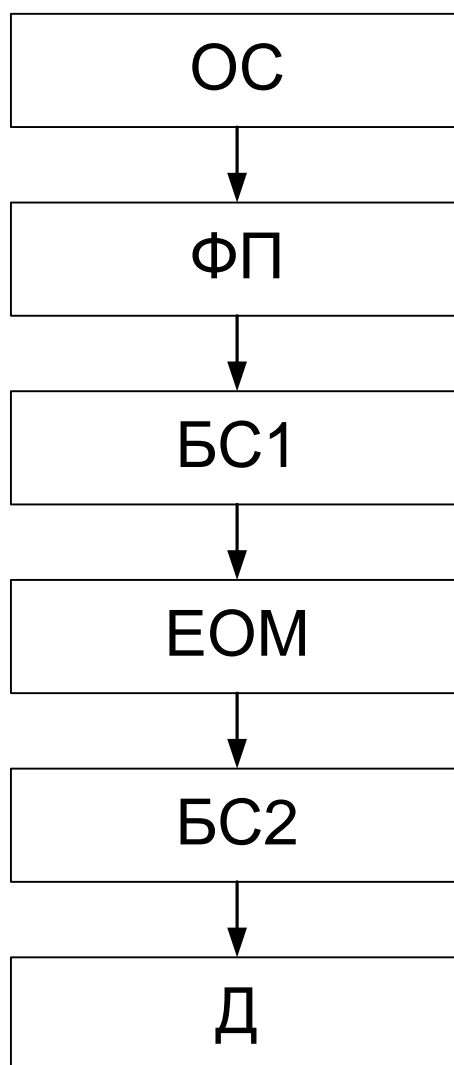


Рис. 1.1 – Структурна схема СТЗ

Розглянемо алгоритм роботи СТЗ відповідно до рисунку 1.1. Оптична система (ОС) формує зображення об'єкта в площині фотоприймача (ФП). Через вхідний блок сполучення (БС1) інформація про зображення в вигляді електричних сигналів вводитьься в ЕОМ, де проводиться його обробка. Оброблена інформація через вихідний блок сполучення (БС2) надходить на вхід дисплея (Д), де відображається вихідне зображення. Кожна ланка оптико-електронного тракту СТЗ має свій імпульсний відгук, і зображення на екрані дисплея можна розрахувати, послідовно повторюючи операцію згортки імпульсного відгуку поточної ланки з сигналом на виході попереднього.

Комплексний коефіцієнт передачі (частотна характеристика).

Для опису проходження сигналу через лінійну систему в частотній області треба виконати перетворення Фур'є згортки вхідного сигналу і імпульсної характеристики системи. Перетворення Фур'є від згортки дорівнює добутку перетворень Фур'є двох сигналів. В результаті отримаємо такий вираз:

$$S_{\text{ВЫХ}}(\omega) = S_{\text{ВХ}}(\omega)K(\omega) \quad (1.20)$$

Де $S_{\text{ВХ}}(\omega)$ і $S_{\text{ВЫХ}}(\omega)$ - спектральна щільність вхідного і вихідного сигналу згідно, $K(\omega)$ - комплексний коефіцієнт передачі, який є перетворенням Фур'є імпульсної характеристики системи:

$$K(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1.21)$$

Модуль і фаза комплексного коефіцієнту передачі є відповідно амплітудно-частотною (АЧХ) і фазо-частотною (ФЧХ) характеристиками системи. Значення $K(\omega)$ показує як змінюється при проходженні через систему комплексна амплітуда синусоїди з частотою ω .

АЧХ показує, у скільки разів змінюється амплітуда синусоїди, а ФЧХ - яким буде отриманий нею фазовий зсув.

Комплексний коефіцієнт передачі для оптичних систем називається оптичною передавальною функцією (ОПФ). Для отримання ОПФ багатоланцюгової системи досить перемножити ОПФ всіх ланок:

$$K_{\Sigma} = K_{\text{ОП}} + K_{\text{ФП}} + K_{\text{БС1}} + K_{\text{ЕОМ}} + K_{\text{БС2}} + K_{\text{Д}} \quad (1.22)$$

Коефіцієнт передачі за проектною потужністю.

Коефіцієнт передачі за проектною потужністю дорівнює квадрату модуля комплексного коефіцієнта передачі, тобто квадрату АЧХ:

$$K_M(\omega) = K(\omega) \cdot K(\omega) = |K(\omega)|^2 \quad (1.23)$$

Функція передачі.

Якщо застосувати до обох частин диференціального рівняння перетворення Лапласа, то вийде вираз для функції передачі:

$$H(s) = \frac{(s-z_m)(s-z_{m-1})(s-z_{m-2})\dots(s-z_1)}{(s+p_n)(s+p_{n-1})(s+p_{n-2})\dots(s+p_1)} \quad (1.24)$$

Де $k = b_m/a_n$ – коефіцієнт посилення (gain), z_1 – нулі функції передачі (zeros), p_1 – полюси функції передачі (poles).

Квантування і дискретизація сигналів, Аналого-цифрове і цифро-аналогове перетворення.

Узагальнена схема цифрової обробки сигналів наведена на рис. 2.

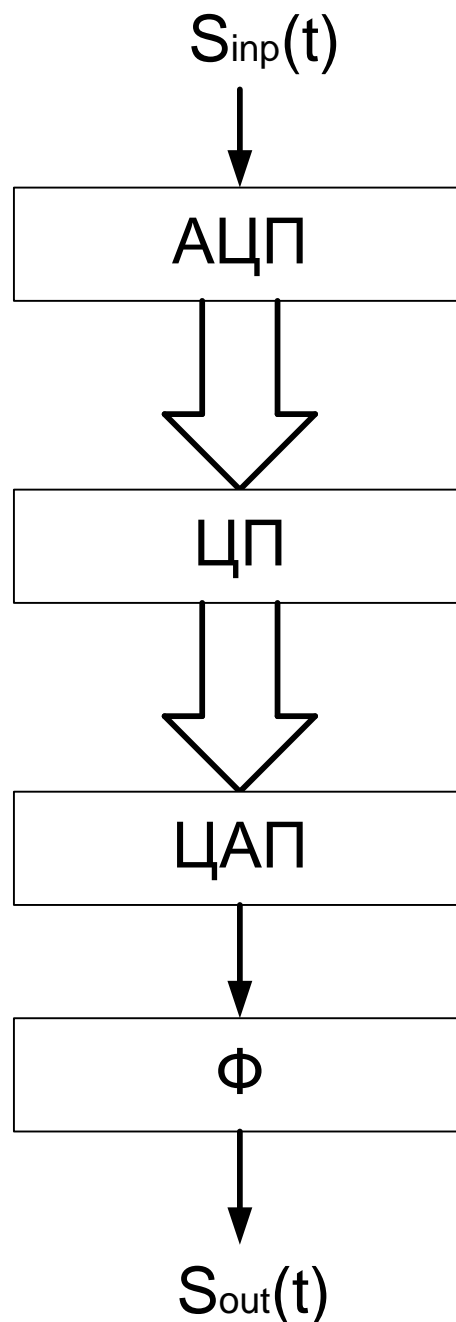


Рис. 1.2 – Тракт перетворення сигналу

Зображення безперервно за координатами x і y , а також за амплітудою. Щоб перетворити цю функцію в цифрову форму, необхідно представити її відліками по обох координатах і по амплітуді. Подання координат у вигляді кінцевої кількості відліків називається дискретизацією, а представлення амплітуди набором кінцевих значень – квантуванням.

Розглянемо тракт перетворення оптико-електронного сигналу. На вхід СТЗ надходить аналоговий сигнал $S_{вх}(t)$. Його часова дискретизація і квантування за рівнем виробляється в аналого-цифровому перетворювачі (АЦП). Взагалі ці два процеси - дискретизація і квантування - є незалежними один про одного, але вони, як правило, виконуються всередині однієї мікросхеми. Вихідним сигналом АЦП є послідовність чисел, що надходить в цифровий процесор ЦП, що виконує необхідну обробку. процесор виконує різні математичні операції над вхідними відліками: раніше отримані відліки і проміжні результати можуть зберігатися в пам'яті процесора для використання в подальших обчисленнях. Результатом роботи процесора є нова послідовність чисел, що являють собою відліки вихідного сигналу.

Аналоговий вихідний сигнал $S_{вих}(t)$ відновлюється по цій послідовності чисел за допомогою цифрово-аналогового перетворювачі (ЦАП). Напряга на виході ЦАП має ступінчасту форму; при необхідності воно може бути перетворено в плавно змінюваний вихідний сигнал з допомогою фільтра Φ , що згладжує сигнал.

Пристрої, які реалізуються за допомогою структури типу рис. 1 можуть мати найрізноманітніший характер. Кількість пам'яті для зберігання цифрового зображення залежить як від дозволу так і від глибини кольору, і може бути приблизно визначено множення кількістю пікселів на кількість біт співвідносять одному пікселю.

Найбільш часто зустрічаються такі випадки:

- два рівня яскравості (бінарне зображення);
- 256 рівнів яскравості (один байт на піксель - півтонування);
- 65536 рівнів яскравості (два байта на піксель);
- 16,7 млн. кольорів (три байта на піксель, (червоний, синій, зелений)).

Частота Найквіста.

Гармонійний сигнал може бути адекватно представлений дискретними відліками, якщо його частота не перевищує половини частоти дискретизації $f_N = f_D/2$.

Максимальний крок h в просторовій решітці при відліку вихідного зображення, повинен вибиратися з наступної умови:

$$h < \frac{1}{2f_m} \quad (1.25)$$

де f_m - максимальна просторова частота зображення

Типи зображень.

Існують два принципово різних підходи до опису зображення.

Зображення може бути описано математично як набір графічних примітивів (коло, прямокутник, лінія і т.п.), побудова яких і формує зображення. таке зображення називається векторним. Якщо зображення описується двовимірним масивом, кожен елемент якого є деякий опис кольору, то таке зображення називається растровим. Елемент растрового зображення називають пікселем (від pixel, pictureelement - елемент зображення) або точкою.

Існують кілька типів растрових зображень. Вони відрізняються один від одного способами представлення і збереження інформації про колір або яскравості пікселя в пам'яті. Колір утворюється в наслідок змішування декількох складових, які можуть бути задані в різних колірних системах або системах колірних координат (colorspace). Термін глибина кольору (colordepth) використовується для позначення того, скільки біт необхідно для зберігання інформації про кольору пікселя.

Обсяг пам'яті в байтах, необхідний для зберігання растрових зображень, можна обчислити за формулою:

$$V = (c * r * d)/8 \quad (1.26)$$

де c - кількість стовпців; r - кількість рядків; d - глибина кольору (біт / піксель).

Існують наступні типи растрових зображень, кожен з яких призначений для вирішення певного кола завдань:

- бінарні - (black and white) пікселі можуть приймати тільки два значення: 0 і 1 (чорний і білий колір);

- півтонові (сірі або зображеннями в градаціях сірого Intensity, Grayscale) – пікселі можуть приймати одне із значень інтенсивності якого-небудь одного кольору в діапазоні від мінімальної до максимальної інтенсивності;
- палітрові (Indexed) - значення пікселів є посиланнями на комірки карти кольорів (Colormap), які і містять описи кольору пікселя в деякій колірній системі. Подібну карту кольорів часто називають палітрою (palette);
- повно-кольорові - (Truescolor, RGB) або просто кольоровими називають зображення, пікселі якого безпосередньо зберігають інформацію про інтенсивності колірних складових.

Пікселі зображень, представлені масивами в форматі double і uint8, повинні задовольняти вимогам, наведеними в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Тип зображення	double	uint8
Бінарне	Значення 0 і 1	Значення 0 і 1
Півтонове	Діапазон значень [0,1]	Діапазон значень [0,255]
Палітрове	Діапазон значень [0, розмір палітри], значення 1 вказує на перший рядок палітри	Діапазон значень [0,255], значення 0 вказує на перший рядок палітри
Палітрове	Діапазон значень [0,1]	Діапазон значень [0,255]

Напівтонові і бінарні зображення зберігаються у вигляді двовимірних масивів. Для доступу до значенням (в даному випадку яскравості) пікселя зображення I треба вказати рядок r і стовпець c : $I(r,c)$.

Повно-кольорові зображення зберігаються у вигляді тривимірних масивів, де третій вимір - значення інтенсивності R , G , B . Для доступу до значень інтенсивності колірних складових пікселя I треба вказати рядок r , стовпець c і номер складової: 1 - для R , 2 - для G , 3 - для B , наприклад, $I(r, c, 1)$ дозволяє отримати значення червоної складової.

Палітрові зображення зберігаються у вигляді двовимірних масивів індексів. Для кожного палітрового зображення існує двовимірний масив палітри. Масив палітри завжди має тип double і в трьох його шпальтах розташовані інтенсивності R , G , B .

1.3. Виділення контурів зображень

Важливим просторовим процесом з використанням згортки є виділення контурів(посилення країв) зображення. За визначенням край представляє собою область з великим значенням інтенсивності. Виділення контурів зображення використовується як попередній крок в процесі вилучення ознак. Алгоритми посилення країв стискають зображення до країв, тому фон втрачається. Яскравість країв після посилення пропорційна зміні яскравості, що оточує край в початковому зображенні.

Хоча посилення краю в основному використовується в машинному зорі, воно має й інші застосування. Наприклад, його можна використовувати як художній метод для виготовлення оригінальних зображень, які можуть потім ретушувати в графічних редакторах для створення високохудожнього зображення. Треба відзначити, що всі алгоритми посилення краю, які використовують згортку, є лінійними.

Виділення контуру за Лапласом.

Метод виділення контуру за Лапласом відрізняється від інших методів тим, що він не залежить від напрямку, тобто контури висвічуються незалежно від напрямку, дають більш різкий контур, ніж при інших алгоритмах виділення. Додатково він висвічує контури, що мають як позитивні, так і негативні зміни яскравості. Функція Лапласа записується наступним чином:

$$L(f(x,y))=d^2f/dx^2 + d^2f/dy^2, \quad (1.31)$$

де d^2f/dx^2 та d^2f/dy^2 - другі приватні похідні по x і y .

Для дискретних функцій другі похідні можуть бути апроксимовані наступним чином:

$$d^2f/dx^2=f(x+1)-2\cdot f(x)+f(x-1) \quad (1.32)$$

$$d^2f/dy^2=f(y+1)-2\cdot f(y)+f(y-1) \quad (1.33)$$

Таким чином, лапласіан можна записати в наступному вигляді:

$$L(f(x,y)) = f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1) - 4\cdot f(x,y) \quad (1.34)$$

Маски лапласівських фільтрів можуть мати наступний вигляд:

$$\begin{array}{cccccccc} 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -2 & -1 \\ -1 & -4 & -1 & -1 & 8 & -1 & -2 & 4 & -2 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -2 & -1 \end{array}$$

$$\sum=0$$

Всі операції щодо посилення краю послаблюють низькочастотні просторові компоненти зображення. Области постійної інтенсивності або лінійно зростаючої стають чорними, а області швидкозмінних значень інтенсивності яскраво висвічуються. Такі фільтри, що ослаблюють низькочастотні компоненти, мають коефіцієнти, сума яких дорівнює нулю.

Якщо до центральних елементів фільтрів Лапласа додати одиницю, то після фільтрації буде мати місце ефект прямого додавання згорнутого зображення до вихідного.

Виділення контурів операторами Превіта і Собела.

Маски фільтрів Превіта і Собела мають такий вигляд:

для посилення краю по вертикалі: для посилення краю по вертикалі:

$$\begin{array}{cccccc} 1 & 0 & -1 & 1 & c & 1 \\ c & 0 & -c & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & -c & -1 \end{array}$$

$c = 1$ для маски фільтра Превіта;

$c = 2$ для маски фільтра Собела

За результатами випробувань були зроблені висновки, що маска фільтра Собела дає неправдиві контури по перепаду 90° .

Посилення краю методом зсуву і різниці.

Цей алгоритм підсилює краї зображення, зрушуючи зображення на елемент, а потім віднімаючи зрушене зображення з вихідного. Результатом віднімання є вимір нахилу розподілу яскравості. В області постійної інтенсивності результатом вирахування буде нахил, рівний нулю. В області з великими змінами інтенсивності, наприклад, на краю, віднімання дасть велике значення нахилу, що призводить до появи світлого елемента зображення. При цьому застосовують абсолютне значення функції, щоб алгоритм зсуву і різниці міг реєструвати краї переходу від чорного до білого, так і від білого до чорного.

Для посилення зображення зміщується вліво на один елемент і потім віднімається з вихідного. Для посилення зміщується вгору на один елемент і віднімається. Для посилення вертикальних і горизонтальних країв перед вирахуванням зміщується вліво на один елемент, а потім вгору. Хоча це наближення здається простим, його здійснення досить складне. Тому замість

фактичного зсуву зображення використовується згортка для отримання того ж ефекту. Нижче наведені маски:

$$\begin{array}{cccccc} 0 & 0 & 00 & -1 & 0-1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 00 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

вертикальні краї горизонтальні краї вертикальні і

горизонтальні краї

Метод спрямованого градієнта.

Іноді треба висвітлити і інші контури (краї) зображення, не тільки вертикальні або горизонтальні. Можуть бути важливі діагональні краї. Виборче висвітлення країв в різних напрямках використовується іноді для того, щоб отримати загальне уявлення про зображення. Для висвітлювання країв в восьми різних напрямках використовуються 8 різних масок. Ці напрямки називаються як сторони світу. Маски наведені нижче:

північ північний схід схід південний схід

$$\begin{array}{cccccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1-1 & 1 & 1-1 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & -1 & -2 & 1-1 & -2 & 1-1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1-1 & -1 & 1-1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

південь південний захід захід північний захід

$$\begin{array}{cccccc} -1 & -1 & -11 & -1 & -11 & 1 & -11 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & 1 & -2 & -11 & -2 & -11 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -11 & -1 & -1 \end{array}$$

чим більше нахил, тим яскравіше елемент.

Розмиті зображення.

Розмиті зображення можна отримати, використовуючи згортку зображення з фільтром, маска з ваговими коефіцієнтами якого наведена нижче:

$$\begin{array}{cccc} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

Таке усереднення викликає зменшення деталей зображення за рахунок усереднення всіх значень елементів в області примикання.

Виділення контурів зображень за допомогою алгоритму Кенні.

Популярним алгоритмом контурної фільтрації зображень є алгоритм Кенні (Canny edge detection), розроблений Джоном Кенні (Австралія) у 1986 році. В бібліотеці OpenCV functions для цього алгоритму існує спеціальна функція cv2.Canny().

Джон Кенні вирішив математичну проблему [17] оптимального фільтру за критеріями виділення, локалізації та мінімізації кількох відгуків границі контуру. Фільтр Кенні є сумою чотирьох експонент і добре наближений до першої похідної функції Гауса.

Фільтр Кенні придушує немаксимуми. Це означає, що пікселями границь стають пікселі, в яких досягнуто локального максимуму градієнта в напрямку вектору градієнта.

Дія алгоритму Кенні полягає спочатку в згладжуванні і отриманні розмитого зображення, що видаляє шум. Потім шукають границі за максимальним значенням градієнту у напрямках вертикальних, горизонтальних та діагональних ребер в розмитому зображенні (Рис. 1.3).

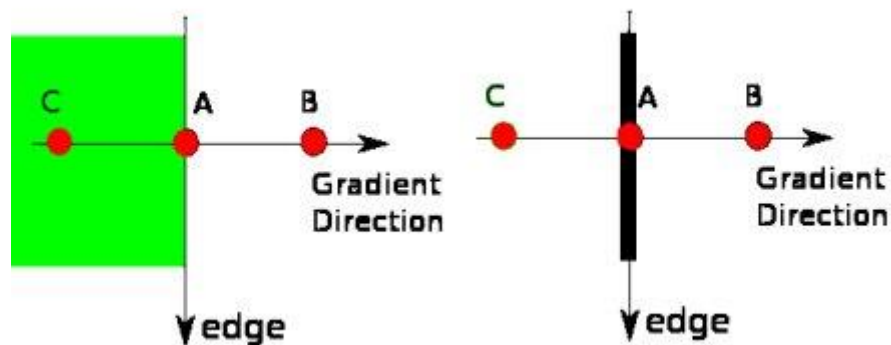


Рис. 1.3. – Виділення границі за максимальним локальним градієнтом

Кут напрямку градієнту може приймати такі значення: 0, 45, 90 та 135 градусів. Тільки локальні максимуми визначаються як границі.

Потенціальні границі визначають максимальним та мінімальним порогом (Рис. 1.4), що забезпечує подвійну порогову фільтрацію.

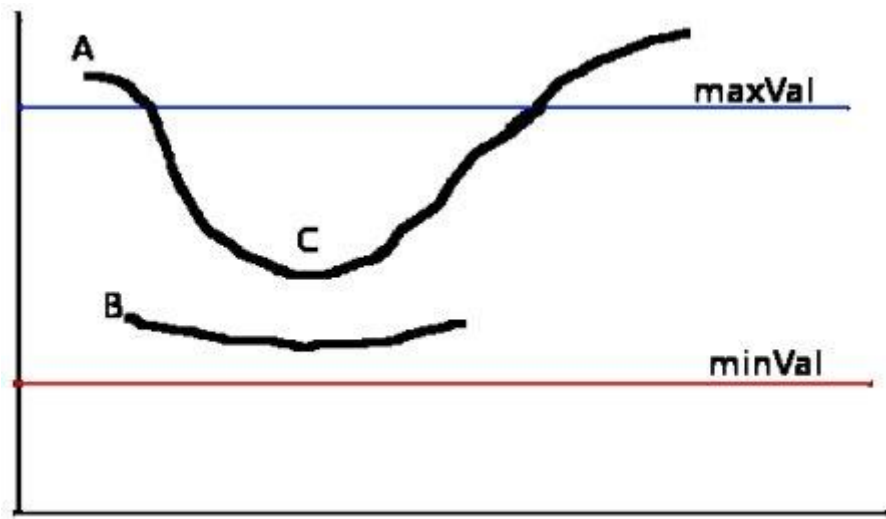


Рис. 1.4. – Межі інтенсивності при подвійній фільтрації зображення

Наприкінці виконують трасування області невизначеності. Кінцеві границі визначають шляхом придушення будь-якого краю, що не є зв'язаним із певною границею. Виконують алгоритм Кенні зазвичай після перетворення зображення у монохромну форму.

1.4. Модель побудови зображення телевізійною або інфрачервоною камерою

Розглянемо співвідношення між координатами точок сцени і їх зображеннями і методи оцінювання параметрів системи реєстрації та тривимірної структури сцени [18].

Різні точки простору предметів відображаються оптичною системою камери в просторі зображень на різних відстанях від фокальної площини.

Однак, якщо відстань між камерою і спостережуваної сценою значно перевищує фокусну відстань оптичної системи, можна вважати, що зображення будується в її фокальній площині. У цьому випадку можна скористатися проєктивної моделлю камери, в якій зображення тривимірного об'єкту виходить проєктуванням його в фокальну площину (площину зображення) через єдину точку, звану оптичним центром. Пряма лінія, перпендикулярна площині зображення і проходить через цю точку, називається оптичною віссю камери, а точка перетину оптичної осі з площиною зображення - головною точкою.

Визначимо в тривимірному просторі ортогональну праву систему координат $O_K X_K Y_K Z_K$, початок якої збігається з оптичним центром, вісь $O_K Z_K$ - з

оптичною віссю камери. Така система називається стандартною системою координат камери. Нехай площину зображення знаходиться на відстані f' від оптичного центру. У цій площині задамо систему координат $O_u X_u Y_u$ з початком в головній точці і осями $O_u X_u$ і $O_u Y_u$, паралельними осям $O_k X_k$ і $O_k Y_k$ відповідно (рис. 1.3).

Легко переконатися, що в стандартній системі координат проекцією точки тривимірного простору з координатами (X_k, Y_k, Z_k) є точка m в площині зображення з координатами $m(x_u, y_u)$, причому

$$x_u = f' \frac{X_k}{Z_k} \quad y_u = f' \frac{Y_k}{Z_k}. \quad (1.35)$$

Для повного опису камери слід врахувати, що для реєстрації зображення в площині зображення камери поміщається фотоелектроні й перетворювач (ФЕП).

У загальному випадку вимір координат в ФЕП здійснюється в одиницях, відмінних від одиниць, які задають координати в стандартній системі. Наприклад, якщо використовується матричний фотоприймач, його природними координатами є номер рядка і номер стовпця фотоприймальної осередки. Тому для повного опису камери необхідно висловити координати точки m в природних одиницях фотоприймача.

У досить загальному для будь-яких фотоприймачів вигляді (рис. 1.5) це може виглядати як

$$u = \frac{x_u}{p_x} + u_0, \quad v = -\frac{y_u}{p_y} + v_0, \quad (1.36)$$

де (U_0, V_0) - координати головної точки відносно початку координат фотоприймача (у природних координатах фотоприймача); p_x і p_y - масштаби уздовж осей $O_u X_u$ і $O_u Y_u$.

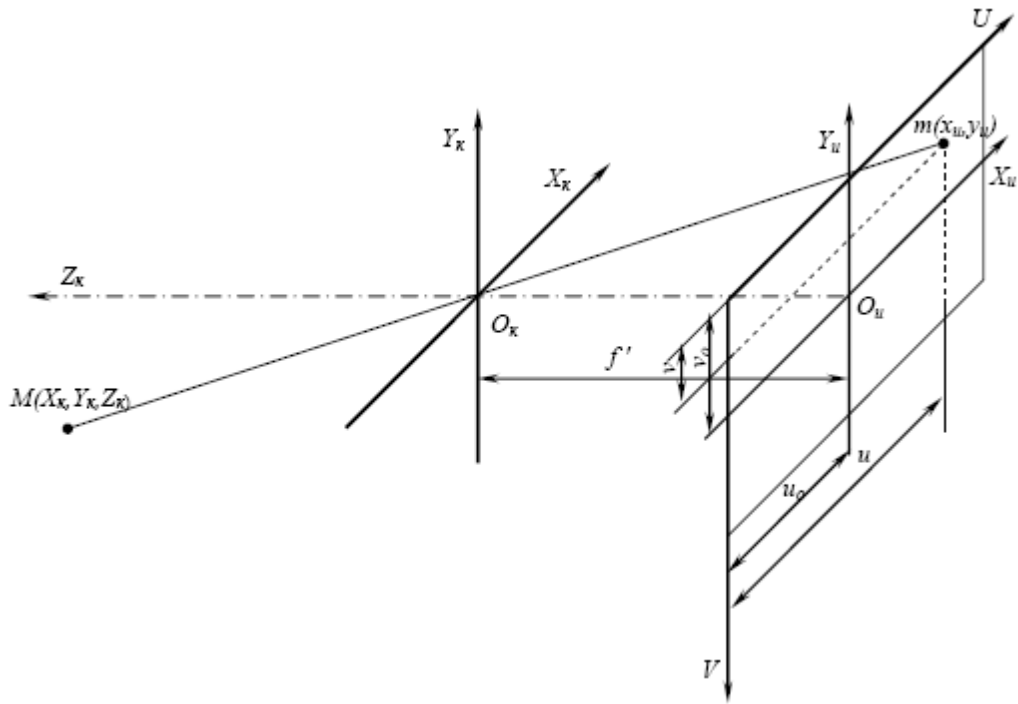


Рис.1.5 – Система координат телевізійної камери, яка проектує зображення

У новій системі координати проєкції точки m приймуть вид

$$u = f' \frac{X_k x_u}{p_x} + u_0, v = f' \frac{Y_k y_u}{p_y} + v_0. \quad (1.37)$$

Для подальшого розгляду введемо тривимірний вектор $M=(X_k, Y_k, Z_k)^T$, відповідний точці M , і двовимірний вектор $m = (x_u, y_u)^T$, відповідний точці m . Визначимо також вектор однорідних внутрішніх координат камери $v=(u,v,1)^T$ використовуючи ці позначення, співвідношення (1.24) можна представити в компактній векторно-матричній записи:

$$Z_k v = AM, \quad (1.38)$$

де $A = \begin{bmatrix} f'/p_x & 0 & u_0 \\ 0 & f'/p_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ - матриця, відома під назвою матриці внутрішніх

параметрів камери, оскільки вона містить тільки параметри оптичної системи і фотоприймача камери.

У загальному випадку тривимірні координати точки можуть бути задані в системі, яка не співпадає зі стандартною системою координат камери $O_k X_k Y_k Z_k$. Нехай є глобальна (світова) система координат $OXYZ$, а $O_k X_k Y_k Z_k$ - стандартна система координат камери. Перехід від системи $OXYZ$ до системи $O_k X_k Y_k Z_k$. можна

здійснити поворотом координатних осей до деякої проміжної системи координат і подальшим зміщенням початку координат.

Тоді зв'язок між координатами точки M в глобальній і стандартній системі може бути представлена як

$$M = RM' + T, \quad (1.39)$$

де M' і M - вектори просторових координат точки M в глобальній та стандартній системах, відповідно; R - матриця розмірності 3×3 , що описує поворот стандартної системи координат щодо глобальної; компонентами матриці є напрямні косинуси осей глобальної системи в стандартній системі координат; T - тривимірний вектор зміщення початку координат глобальної системи відносно початку координат стандартної.

На рисунку 1.6 схематично показано перетворення координат вираз для матриці повороту R має вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \varphi + \sin \psi \cos \varphi & \cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \varphi - \cos \psi \cos \varphi & \sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

де ψ , θ , φ відповідні до ейлеровського повороту для лівої системи координат.

Зміст вектора $T = (t_x, t_y, t_z)^T$: це є вектор переносу.

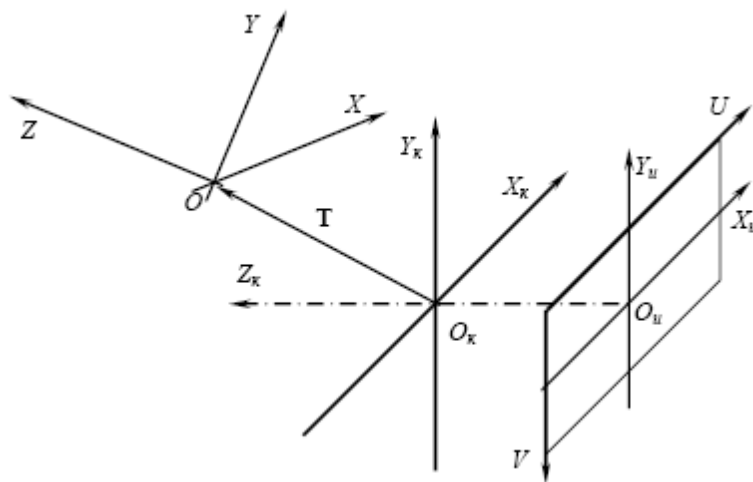


Рис. 1.6– Перехід від глобальної системи координат до системі координат телевізійної камери

Перетворення системи координат є основою побудови та цифрової обробки зображень, які були отримані телевізійною камерою видимого або інфрачервоного діапазонів світла.

1.5 Аналіз математичної моделі лінійного зсуву зображення, яке формує телевізійна вимірювальна система

Розглянемо алгоритм роботи телевізійної вимірювальної системи (ТВС) контролю лінійних зсувів з базою на об'єкті. Як приймач оптичного випромінювання використовується матричний фотоприймач на приладі із поверхневим зсувом заряду (ПЗЗ), слід не забувати про те, що фотоприймач ПЗЗ має матричну структуру з кінцевими розмірами фоточутливих елементів і проміжками нечутливості між ними.

Роль контрольного елементу (КЕ) виконує пара напівпровідникових випромінюючих діодів (точкових об'єктів), відстань між якими і утворює базу в просторі предметів (Рис. 1.7).

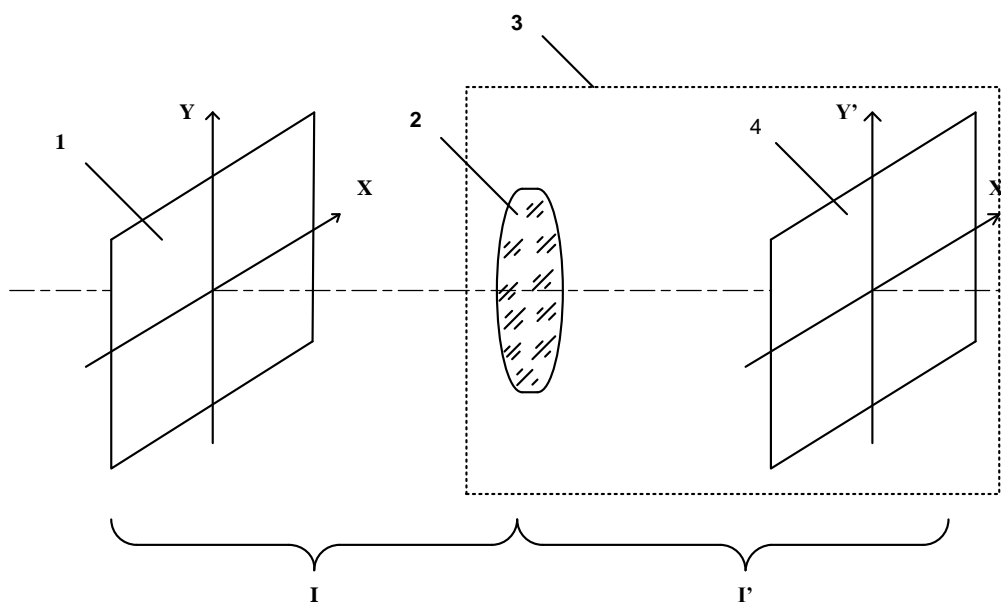


Рис. 1.7 – Загальна схема оптичної частини вимірювального каналу ТВС

Загальна схема оптичної частини ТВС представлена на рис. Основними елементами задатчика вимірювальної бази 3 є приймач оптичного випромінювання 4 і об'єктив 2. Із контрольованим об'єктом зв'язується контрольний елемент 1.

Розглянемо колімаційний варіант реалізації оптичної частини вимірювального каналу і метод визначення координат контрольного елемента,

тому отримані викладки будуть мати місце і в інших випадках реалізації оптичної частини вимірювального каналу, за виключенням не суттєвих або легко внесених доповнень.

Очевидно, що координати контрольного елемента 1, жорстко пов'язаного з об'єктом x і y однозначно, пов'язані з координатами його зображення в площині аналізу x' і y' :

$$\bar{o} = \bar{o}' \left(\frac{L}{f} - 1 \right), \quad (1.41)$$

$$y = y' \left(\frac{L}{f} - 1 \right), \quad (1.42)$$

де L - відстань від контрольного елемента до об'єктива, f - фокусна відстань об'єктива системи.

У розглянутому прикладі присутній коефіцієнт $\left(\frac{L}{f} - 1 \right)$, який заважає реалізувати автоматично калібру вимірювальну систему, без введення в неї додаткових пристроїв зміни дистанцій до КЕ. Фокусна відстань системи змінюється рідко, проте дистанція від КЕ до вимірювального блоку може змінюватися в широких межах, що необхідно враховувати в процесі вимірювання зміщень щоб уникнути зростання похибки вимірювань або отримання невірних результатів.

Для створення вимірювальної системи адаптивної до зміни дистанції необхідно мати апріорну інформацію про відстань між вимірювальним блоком і КЕ, або мати певний еталон зміщення КЕ.

Реалізація першого методу вимагає введення у вимірювальну систему додаткового каналу вимірювання дистанцій, наприклад, далекоміра, що не завжди зручно. Другий метод реалізувати простіше, наприклад, використовуючи КЕ у вигляді пари точкових джерел, відстань між якими відомо з великою точністю, або може бути з'ясовано в процесі юстирування системи (Рис. 1.8). Розглянемо більш докладно другий метод.

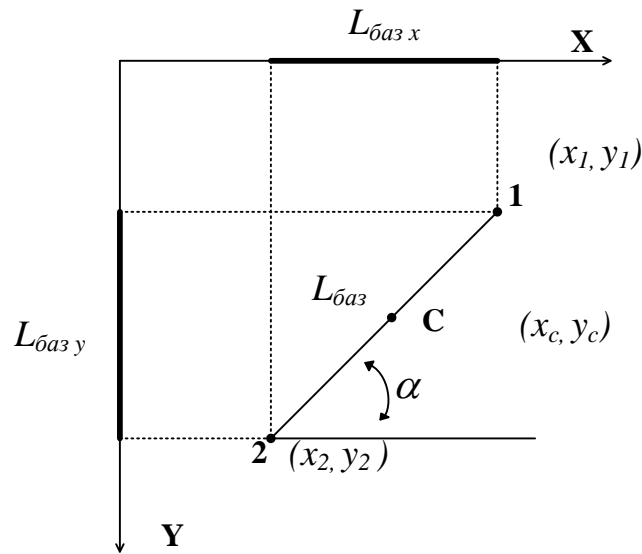


Рис. 1.8– Система координат в просторі предметів

Нехай КЕ складається з двох точкових об'єктів таких, що в момент вимірювання видно тільки один з них, що легко реалізується парою керованих напівпровідникових випромінюючих діодів (НВД), при цьому відстань між ними $L'_{баз}$ в просторі предметів відомо з високою точністю. У цьому випадку за координати КЕ в просторі предметів можна приймати, координати першого (x_1, y_1) , другого (x_2, y_2) НВД або координати середини відрізка (x_c, y_c) , що з'єднує їх (рис.). Координати центру відрізка x_c і y_c визначаються співвідношеннями:

$$x_c = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad (1.43)$$

$$y_c = \frac{y_1 + y_2}{2}, \quad (1.44)$$

Координати центру відрізка в просторі зображень матимуть подібний вигляд:

$$x'_c = \frac{x'_1 + x'_2}{2}, \quad (1.45)$$

$$y'_c = \frac{y'_1 + y'_2}{2}, \quad (1.46)$$

Підставляючи вирази отримуємо:

$$x_c = \frac{x'_1 + x'_2}{2} \left(\frac{L}{f} - 1 \right), \quad (1.47)$$

$$y_c = \frac{y'_1 + y'_2}{2} \left(\frac{L}{f} - 1 \right), \quad (1.48)$$

Далі розглянемо співвідношення між базою $L_{\bar{b}az}$ і її зображенням $L'_{\bar{b}az}$ в просторі зображень, очевидно, що вони пов'язані подібним співвідношенням:

$$L_{\bar{b}az} = L'_{\bar{b}az} \left(\frac{L}{f} - 1 \right), \quad (1.49)$$

причому

$$L'_{\bar{b}az} = \sqrt{(x'_1 + x'_2)^2 + (y'_1 + y'_2)^2}, \quad (1.50)$$

Таким чином, маємо:

$$\left(\frac{L}{f} - 1 \right) = \frac{L_{\bar{b}az}}{\sqrt{(x'_1 + x'_2)^2 + (y'_1 + y'_2)^2}}, \quad (1.51)$$

З (1.51) видно, що значення співвідношення $\left(\frac{L}{f} - 1 \right)$, можна обчислити в процесі вимірювань без введення додатково каналу вимірювання дистанцій, тому $L_{\bar{b}az}$ відомо до початку вимірювань з високою точністю, а значення $L'_{\bar{b}az}$ обчислюється із співвідношення у процесі вимірювань координат точкових об'єктів, що входять до складу . На рисунку (1.9) наведено схему накладання системи координат площини аналізу на матричну структуру.

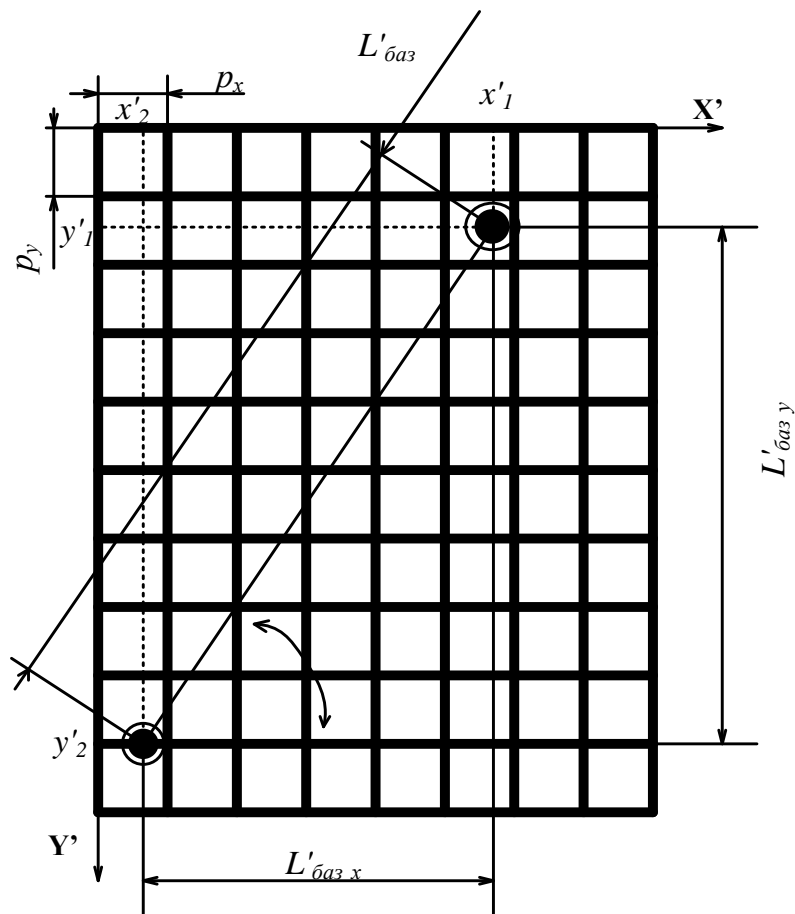


Рис.1.7 - Схема накладання системи координат на матричну структуру

У розглянутій системі в якості приймача оптичного випромінювання використовується матричний фотоприймач на основі ПЗЗ структур, розглянемо процес відновлення координат зображення сформованого даними приймача.

На рис. 1.9 схематично зображено накладення системи координат площині аналізу на матричну структуру, що має як ділянки чутливі до електромагнітного випромінювання (піксель або елемент розкладання), так і зони нечутливості.

На рис.1.9 (x'_1, y'_1) і (x'_2, y'_2) – координати центрів зображення точкових об'єктів, що входять до складу КЕ або іншими словами зображень марок. $L'_{баз}$ - сформована вимірвальна база, $L'_{баз x}$ і $L'_{баз y}$ - проекції вимірвальної бази на координатні осі X і Y , відповідно. α - кут між вимірвальною базою і координатної віссю X , а p_x - горизонтальний розмір фоточутливого майданчика одного елемента матричного приймача з включеною зоною не чутливі, розташованої ліворуч від нього, p_y - вертикальний розмір фоточутливого майданчика одного елемента матричного приймача з включеною зоною не чутливі, розташованої знизу від нього.

Після процедури цифрового кодування відео-сигнал, що знімається з ПЗЗ, записується в оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) блоку, виконує обробку отриманої вимірювальної картини, з метою отримання координат центрів зображень марок.

На рис. 1.10 зображений вид умовної системи координат, пов'язаної із зображенням марок, які знаходяться в ОЗП.

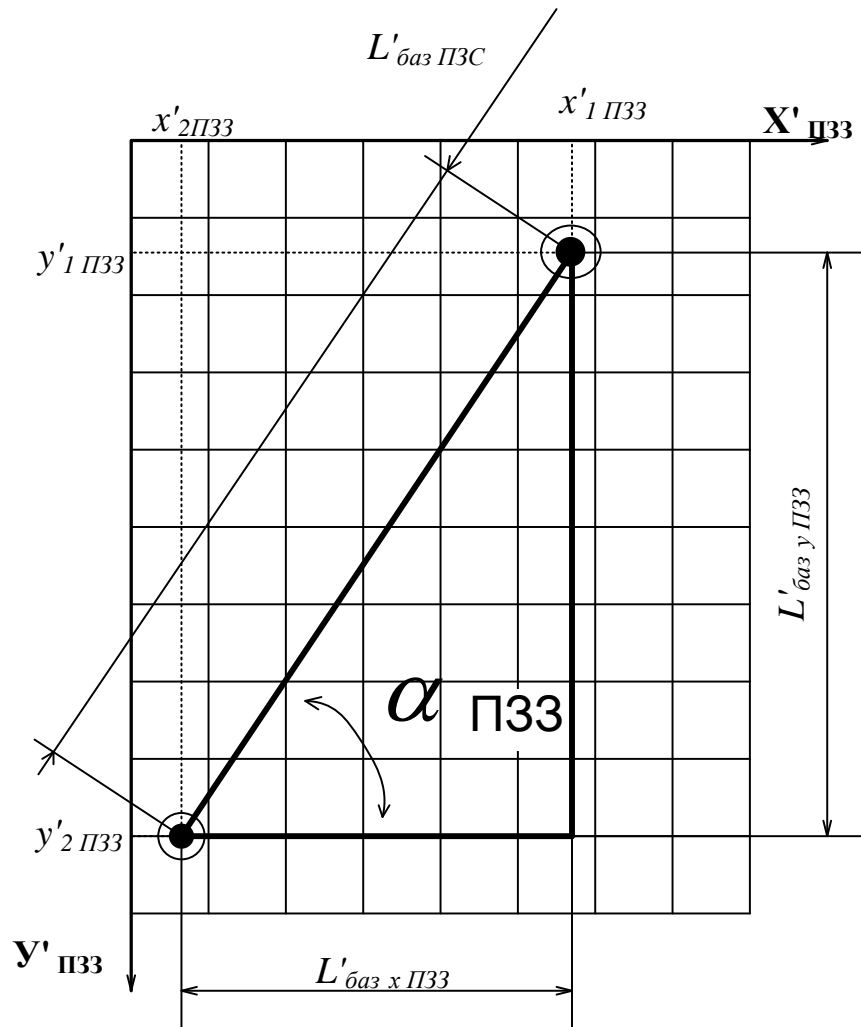


Рис. 1.10 – Умовна система координат, зв'язана з зображенням марок, які знаходяться в ОЗП

Тут $(x_{1 ПЗЗ}, y_{1 ПЗЗ})$ і $(x_{2 ПЗЗ}, y_{2 ПЗЗ})$ обчислені за певним алгоритмом координати, наприклад, методом центру ваги, першої та другої марок, відповідно. $L_{баз ПЗЗ}$ - сформована вимірювальна база, $L_{баз x ПЗЗ}$ і $L_{баз y ПЗЗ}$ - проекції вимірювальної бази на координатні осі $X_{ПЗЗ}$ і $Y_{ПЗЗ}$, відповідно; $\alpha_{ПЗЗ}$ - кут між вимірювальною базою і координатної віссю $X_{ПЗЗ}$.

Після виконання цифрового кодування відеокадру, сформованого ПЗС приймачем, і записи його в ОЗП, втрачається інформація про розміри горизонтальному і вертикальних розмірах елемента розкладання p_x і p_y , що

призводить до лінійних спотворень, у зв'язку з цим необхідно проводити процедуру відновлення координат, очевидно, що координати в площині аналізу пов'язані з умовними координатами співвідношенням [18]:

$$x'_1 = p_x \times x_{1ПЗС}, y'_1 = p_y \times y_{1ПЗС} \quad (1.52)$$

$$x'_2 = p_x \times x_{2ПЗС}, y'_2 = p_y \times y_{2ПЗС} \quad (1.53)$$

В результаті, зі сказаного вище це співвідношення приймає вигляд:

$$\left(\frac{L}{f} - 1\right) = \frac{L_{\text{баз}}}{\sqrt{p_x^2 (x_{1ПЗС} - x_{2ПЗС})^2 + p_y^2 (y_{1ПЗС} - y_{2ПЗС})^2}}, \quad (1.54)$$

при цьому варто відзначити, що $L_{\text{баз}}$ відомий параметр, значення $x_{1ПЗС}$, $y_{1ПЗС}$, $x_{2ПЗС}$, $y_{2ПЗС}$ визначаються в результаті вимірювання, а коефіцієнти p_x і p_y визначаються виходячи, з параметрів ПЗЗ приймача і уточнюються в процесі юстирування системи. Таким чином, здійснюється автоматичне калібрування вимірювальної системи, виробляється відв'язування від відстані до КЕ і фокусної відстані об'єктива системи.

Підставляючи значення $\left(\frac{L}{f} - 1\right)$, отримуємо залежності, що зв'язують координати марок КЕ в просторі зображень, з координатами із зображень, сформованими матричним приймачем:

$$x = \frac{x_{ПЗС} L_{\text{баз}}}{(x_{1ПЗС} - x_{2ПЗС}) \sqrt{1 + M_{yx}^2 \left(\frac{y_{1ПЗС} - y_{2ПЗС}}{x_{1ПЗС} - x_{2ПЗС}}\right)^2}} \quad (1.55)$$

$$y = \frac{y_{ПЗС} L_{\text{баз}}}{(y_{1ПЗС} - y_{2ПЗС}) \sqrt{1 + M_{yx}^2 \left(\frac{x_{1ПЗС} - x_{2ПЗС}}{y_{1ПЗС} - y_{2ПЗС}}\right)^2}} \quad (1.56)$$

де $M_{yx} = P_y / P_x$, таким чином, якщо при вимірах не відбуватиметься скручування, при яких зображення марок будуть перебувати на одній вертикальній або горизонтальній прямих, то в розрахунках зручніше використовувати варіант з параметром M_{yx} , цей параметр легко визначається з характеристик матриці і уточнюється в процесі калібрування системи.

Висновки до розділу 1

В розділі 1 проведено теоретичний аналіз алгоритмів обробки сигналів цифрової матричної телевізійної камери. Ці алгоритми використовують і при отриманні зображень камерою для інфрачервоної термографії.

На основі проведеного аналізу ми можемо стверджувати, що дефекти різної природи, які можна збудити та візуалізувати на поверхні фотоелектричних сонячних елементів і батарей тим або іншим методом, можна обробляти за відомими алгоритмами для звичайних телевізійних зображень.

Особливу увагу необхідно приділити алгоритмам контурної фільтрації з метою зменшення похибки вимірювання геометричних розмірів дефектів сонячних елементів, зокрема, теплових полів «гарячих зон». Це надасть можливість підвищити точність визначення теплової потужності дефектної зони, що надасть новий об'єктивний критерій якості фотоелектричних сонячних батарей при їх виробництві і експлуатації.

Основним алгоритмом контурної фільтрації є градієнтний метод визначення границь. Одним із реалізованих за цим методом фільтром є детектор Кенні. Зазначимо, що фільтр Кенні передбачає комплексну обробку зображення і багатокритеріальне оцінювання граничного пікселя.

РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФЕКТНИХ ЗОН СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І БАТАРЕЙ

2.1. Зв'язок між неоднорідністю теплового поля сонячного елемента та його коефіцієнтом корисної дії

В численних роботах доведено зв'язок між наявністю дефектних зон сонячного елемента із його ККД [20-25]. Основним методом збудження дефектів в кремнієвих сонячних пластинах і елементах є пропускання через них зворотного темного струму та їх нагрівання внаслідок виділення тепла Джоуля. Візуалізація теплового поля відбувається застосуванням методу ІЧТ.

ККД сонячного елемента визначають на основі вимірної ВАХ. В лабораторії НАЕПС були виміряні ВАХ чотирьох зразків сонячних елементів на основі кристалічного кремнію (рис.1).

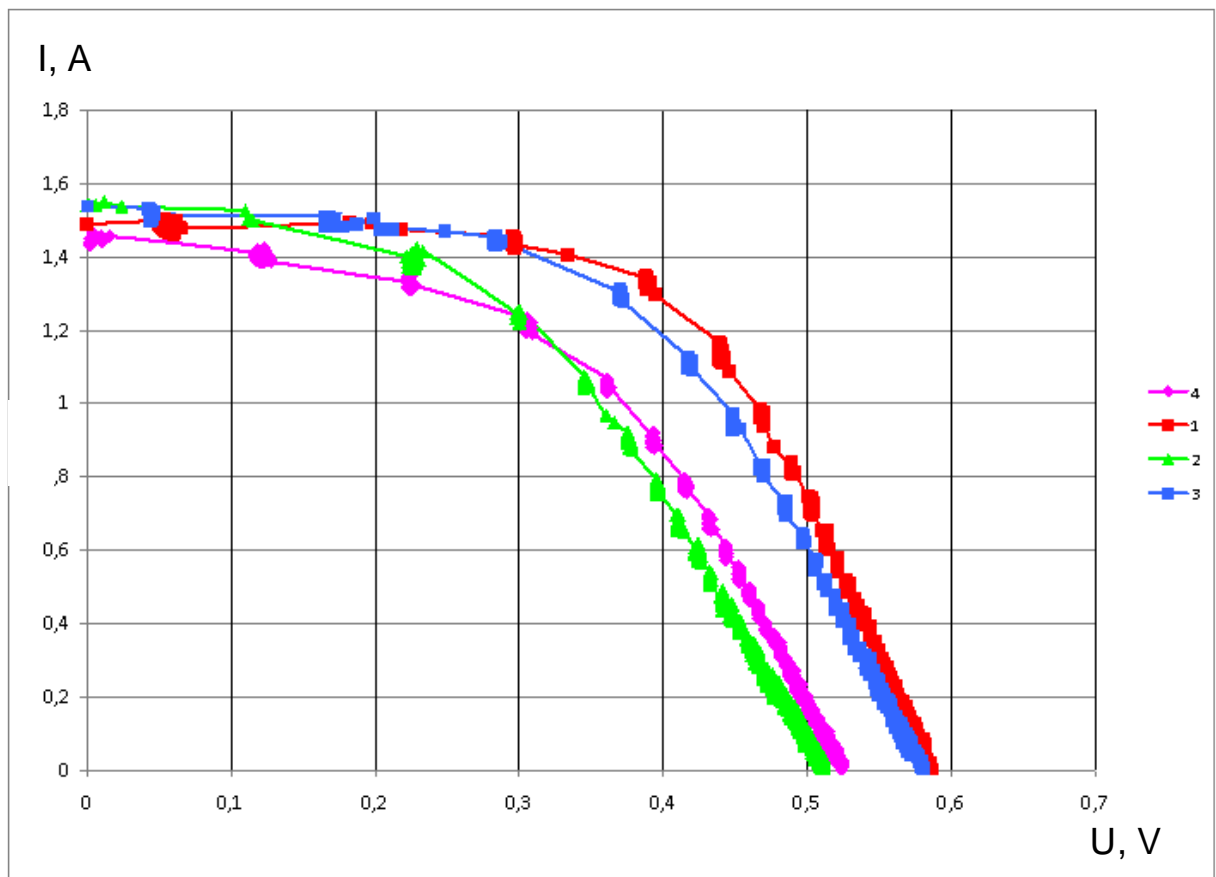


Рисунок 2.1 – ВАХ зразків кремнієвих сонячних елементів

За результатами вимірювання ВАХ був розрахований ККД кожного із чотирьох зразків сонячних елементів. Встановлено, що ККД знаходився в межах від 12% (зразок №4) до 14% (зразок №1).

Методом ІЧТ були отримані теплові поля даних зразків після нагрівання їх від зовнішнього джерела потужністю 6 Вт (рис. 2-9).

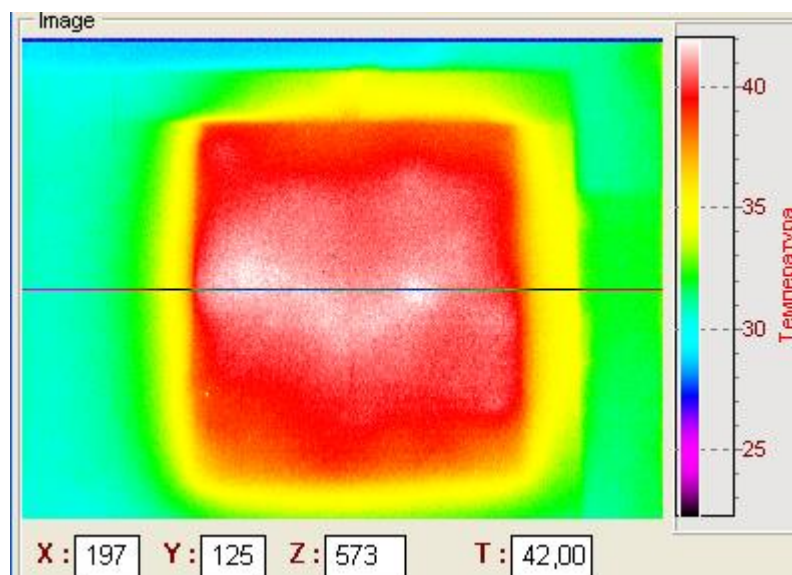


Рисунок 2.2 – Теплове поле зразку №1: координати x та у задано у пікселях; температура T наведена у градусах Цельсія

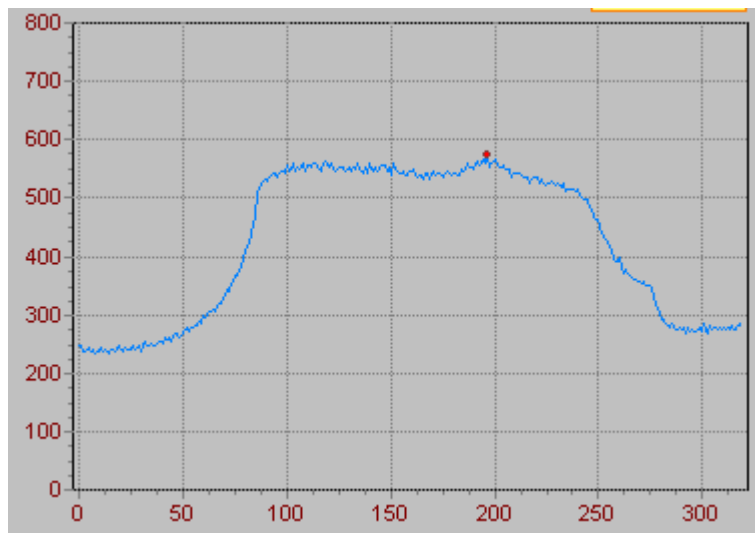


Рисунок 2.3 – Профіль температури у горизонтальному перерізі теплового поля зразку №1: температуру наведено у відносних одиницях; координату x задано у пікселях

Зразок №1 має однорідне теплове поле із середньою температурою $39 \pm 0,5$ град (рис. 2.2, 2.3). Максимальна температура дорівнює 42 град.

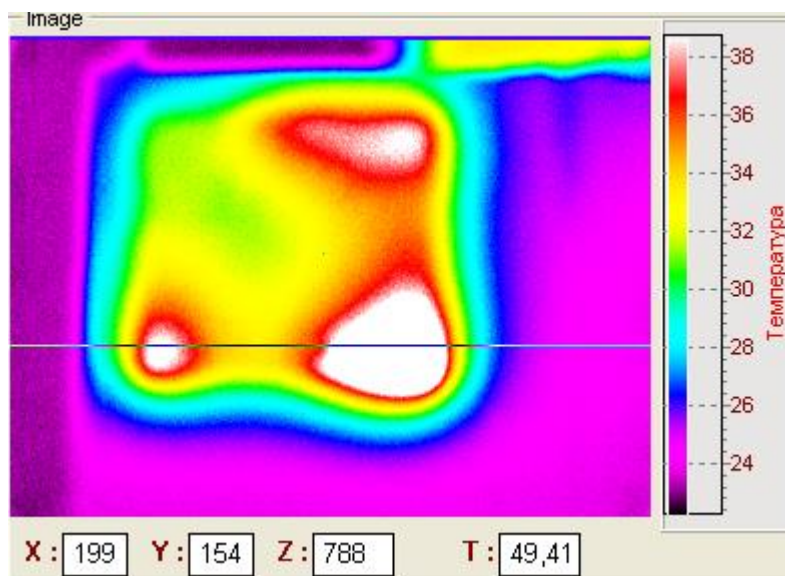


Рисунок 2.4 – Теплове поле зразку №2: координати x та y задано у пікселях; температура T наведена у градусах Цельсія

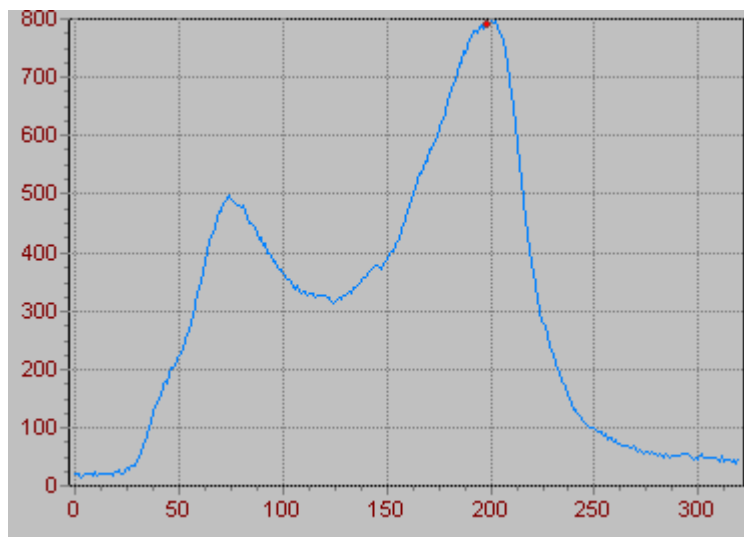


Рисунок 2.5 – Профіль температури у горизонтальному перерізі теплового поля зразку №2: температуру наведено у відносних одиницях; координату x задано у пік селлах

Зразок № 2 має великі неоднорідності теплового поля на поверхні, при максимальній температурі 50 град (рис. 2.4, 2.5).

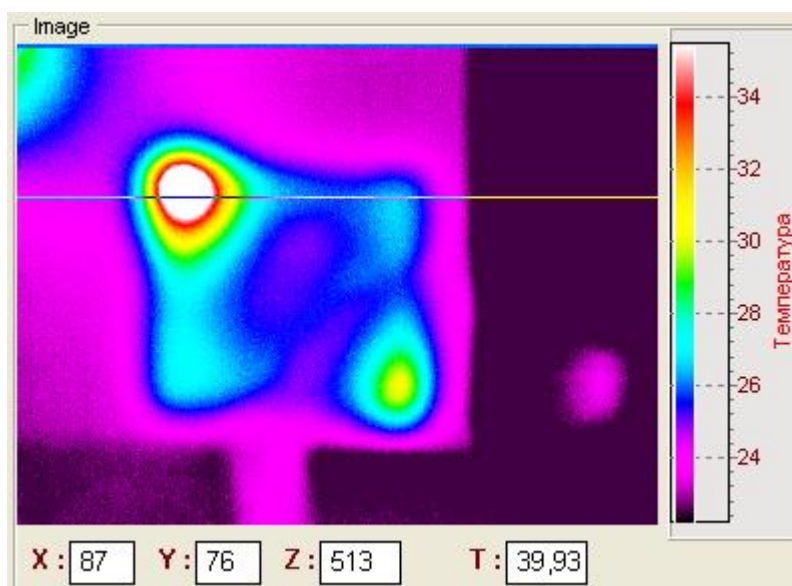


Рисунок 2.6 – Теплове поле зразку №3: координати x та y задано у пікселях; температура T наведена у градусах Цельсія

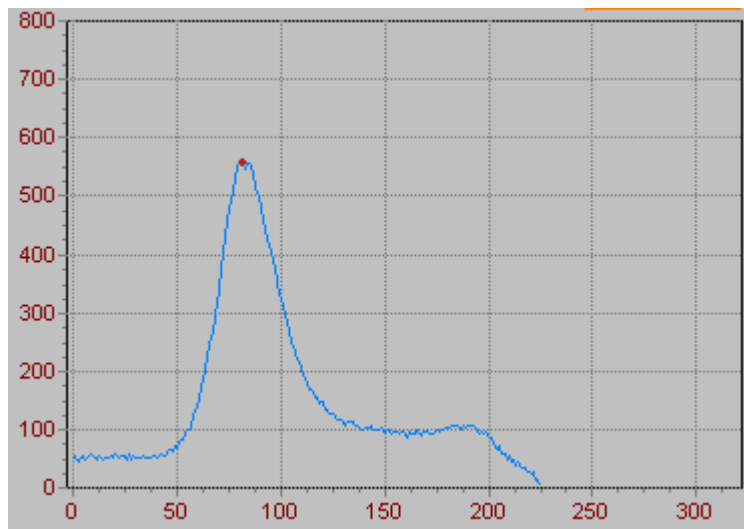


Рисунок 2.7 – Профіль температури у горизонтальному перерізі теплового поля зразку №3: температуру наведено у відносних одиницях; координату x задано у пікселях

Зразок №3 має відносно невеликі за площею зони дефектів (до 5% від загальної площі) з температурою до 40 град.

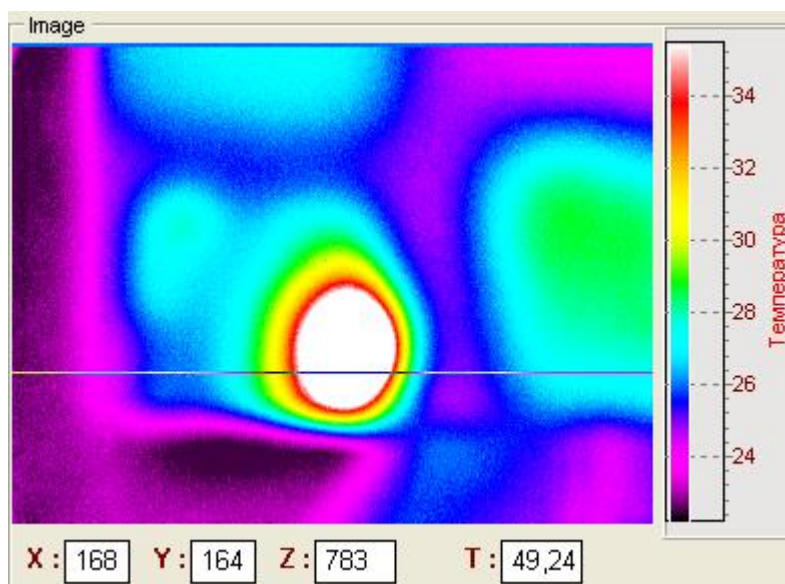


Рисунок 2.8 – Теплове поле зразку №4: координати x та y задано у пікселях; температура T наведена у градусах Цельсія

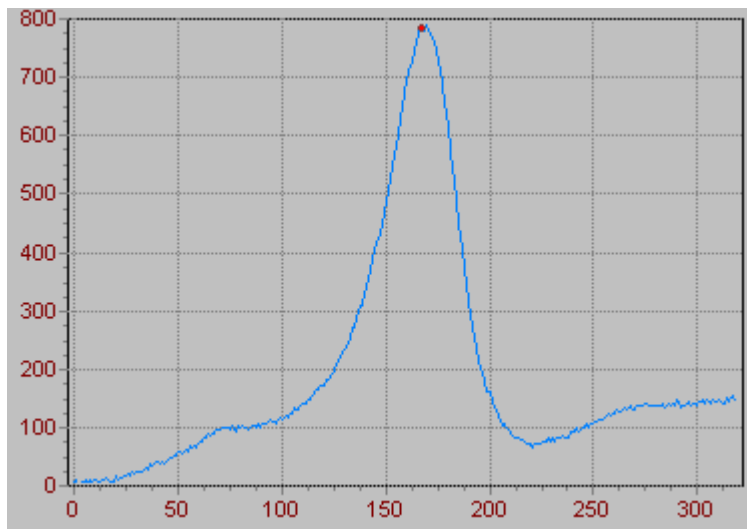


Рисунок 2.9 – Профіль температури у горизонтальному перерізі теплового поля зразку №4: температуру наведено у відносних одиницях; координату x задано у пікселях

Зразок №4 має дефектну зону, яка складає більше 20% від загальної площі поверхні сонячного елемента. Температура в зоні дефекту сягає 50 град.

Порівняльний аналіз теплових полів зразків сонячних елементів та пошук їх кореляції із формою ВАХ дозволяє зробити наступні висновки:

- зразки із рівномірним тепловим полем мають найбільш наближену до прямокутної форми ВАХ (зразок №1), що відповідає найбільшому ККД;
- нерівномірність теплового поля із відносною площею «гарячої зони» більше 10% від загальної площі поверхні сонячного елемента свідчить про зниження ККД на 2% і більше; при цьому ВАХ має характерний «завал» і більш відрізняється від прямокутної форми зразку №1;
- значне перегрівання зони дефекту (до 50 градусів за Цельсієм і більше) також має кореляцію із «завалом» ВАХ і зниженням ККД;
- нагальною науковою задачею постає вдосконалення вимірювання геометричних розмірів зображень теплового поля дефектних зон сонячних елементів на основі впровадження відповідних алгоритмів, зокрема контурної фільтрації; вирішення даної задачі зменшить похибки вимірювання геометричних розмірів та розрахунків теплової потужності дефектних зон і надасть дієвий критерій для контролю якості ФЕСБ під час їх виробництва, продажу або експлуатації.

2.2. Візуалізація «гарячих зон» методом інфрачервоної термографії

ІЧТ є дієвим методом контролю дефектних зон типу “hot spots” напівпровідникових пластин взагалі і кремнієвих сонячних елементів зокрема. Проте, як зазначено в [26], ІЧТ об’єктів досі залишається якісним методом. Для визначення розмірів і координат дефектів на поверхні об’єкту контролю в наш час відсутні підходи до створення програмно-апаратних засобів, які б дозволяли за розподіленням температури на початкових термограмах оцінювати технічний стан об’єктів в умовах експлуатації. Основними задачами досліджень для вирішення даної проблеми [26] є:

- застосування контролю дефектів в умовах стаціонарного режиму формування температурного поля, цей метод характерний для об’єктів з постійними внутрішніми джерелами тепла;
- термографія дефектів в умовах створення нестаціонарного теплового поля при зовнішній тепловій дії на об’єкт;
- розробка стандартних та контрольних зразків для термографічного контролю;
- розробка нових лазерно-термографічних приладів контролю для задач теплової дефектометрії;
- вдосконалення алгоритмів розрахунку площі дефектів та побудови 2D або 3D сітки розрахованих дефектів.

При застосуванні термографії границю дефекту на термограмі визначають за температурним контрастом або «сигналом від дефекту» [26].

На наш погляд, використання стаціонарного режиму є ефективним при термографії дефектів ФЕСБ в режимі протікання зворотного темного струму від зовнішнього джерела живлення. При прогріванні батареї протягом приблизно 600 с встановлюється стаціонарний режим нагріву, при якому батарея віддає оточуючому середовищу стільки тепла, скільки вона отримує при перетворенні темного струму у джоулеве тепло, а на її поверхні утворюється незмінне у часі теплове поле.

Нерівномірність температурного поля СЕ або ФЕСБ свідчить про наявність дефектів, які є джерелами додаткового локального нагрівання [27].

Нагрівання СЕ здійснюють темновим струмом, який пропускають через елемент, з'єднавши його із зовнішнім джерелом живлення. Для прямого темного струму [27] типовим є режим:

- напруга від +0,5 до +0,6 В;
- щільність струму від 0 до 30 мА/см².

На термограмі спостерігають осередки перегрівання в місцях розташування дефектів, а також під контактними шинами СЕ.

Метод ІЧТ дозволяє також за знятими термограмами поверхні сонячного елемента (в рамках ітераційної моделі) ВАР локальних місць нагрівання [28], в яких зосереджені дефекти типу резистивного шунта та паразитного діоду Шотткі. Нагрівання здійснюють протіканням через СЕ зворотного темного струму.

За ВАР СЕ визначають такий важливий експлуатаційний параметр, як коефіцієнт прямокутності (коефіцієнт форми). Зменшення коефіцієнту форми свідчить про наявність дефектів та деградацію СЕ.

Зазначимо, що даний варіант методу неможливо застосувати для контролю ФЕСБ, оскільки в них 36 або більше елементів з'єднані послідовно і неможливо задавати та вимірювати напругу на окремому елементі. Проте, на наш погляд, цей метод може бути дієвим при застосуванні імпульсного режиму нагрівання темновим струмом.

При зворотному включенні СЕ струм тече через його шунтовий опір. За наявності дефектів типу електричного пробоя, а також електролюмінісцентних точок (технологічних дефектів поблизу контактних шин) на поверхні також утворюються місця локального перегріву. Термограма дозволяє локалізувати місця дефектів та оцінити їх внесок в деградацію .

Метод ІЧТ при використанні зворотного темного струму, на нашу думку, недостатньо опрацьовано для контролю дефектів ФЕСБ. Одним із факторів, який ускладнює застосування цього методу є необхідність використання високої (до 1000 В) напруги, що в умовах експлуатації ФЕСБ не є зручним технологічним рішенням.

Використання прямого струму для ІЧТ ФЕСБ потребує джерел живлення із значно меншою напругою (18-22В для лінійки СЕ із номінальною вихідною напругою 12В).

Вимірювання температури методом ІЧТ [29] побудовано на застосуванні моделі абсолютно чорного тіла (АЧТ). Спектр випромінювання АЧТ визначається законом Планка:

$$dR(\lambda, T)/d\lambda = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} / [\exp(hc/\lambda kT) - 1] \text{ Вт/м}^3, \quad (2.1)$$

де $dR(\lambda, T)/d\lambda$ – спектральна поверхнева густина потоку випромінювання, тобто потужність, яку випромінює одиниця поверхні чорного тіла в одиничному інтервалі довжин хвиль; h – стала Планка; c – швидкість світла; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура чорного тіла в кельвінах.

Для ІЧТ використовують два прозорі атмосферних «вікна» у неперервному спектрі випромінювання: 3-5 мкм та 8-12 мкм. Використання першого «вікна» не є оптимальним для температури в діапазоні 280-350 К з точки зору максимуму спектральної чутливості. Так, аналіз формули (2.1) показує, що максимум спектральної характеристики в цьому діапазоні припадає на довжину хвилі 10 мкм.

Проте, застосування приладів із охолоджуваною рідким азотом матриці надає перевагу перед не-охолоджуваним приладом з робочим діапазоном 8-12 мкм, оскільки охолодження матриці і придушення таким способом шумів дозволяє виконувати вимірювання і на схилі спектральної кривої з достатньою чутливістю.

В наш час найбільше поширення отримали прилади ІЧТ на основі приймачів двох типів: болометричних та на основі фотоефекту [30].

Приймачі на основі фотоефекту, що представляють найбільший комерційний інтерес, випускаються в основному на базі антимоніду індію (InSb), сполуки кадмій-ртуть-телур (HgTeCa), селеніду свинцю (PbSe). Приймачі на базі InSb, PbSe працюють у діапазоні 3–5 мкм, а приймачі на базі HgTeCa – у діапазоні 8–14 мкм.

Головним недоліком приймачів на основі фотоефекту є необхідність охолодження до низьких температур (як правило, з використанням рідкого азоту), що створює певні обмеження при використанні у віддалених малонаселених місцях. Спектральна чутливість таких приймачів на 1–2 порядки вище болометричних, проте вони мають обмежений спектральний діапазон чутливості з явно вираженим максимумом. Постійна часу приймачів на основі фотоефекту змінюється від 1 до 10 мкс, тобто їх можна застосовувати для термографування рухомих об'єктів.

Порівняльний аналіз засобів ІЧТ для діапазонів 3-5 та 8-12 [31-33] не надає помітної переваги одному із цих двох типів приладів. Проте, для задач контролю дефектів ФЕСБ, на наш погляд, слід віддати перевагу охолоджуваним термографам на фотоприймачах із селеніду свинцю, які забезпечують роботу у діапазоні 3-5 мкм і мають достатню спектральну чутливість в діапазоні температур 280 - 400 К.

Експерименти з візуалізації температурних полів СЕ та ФЕСБ реалізовано у навчально-науковій лабораторії неінвазивних методів дослідження біологічних об'єктів НТУУ «КПІ».

Інфрачервоний термограф (рис. 2.10) побудований на основі матричної камери має такі параметри та характеристики [34]:

- матриця камери має 320 x 232 пкс;
- діапазон спектральної чутливості камери 2-5,3 мкм;
- температурна чутливість 0,07 °С;
- охолодження матриці здійснюють рідким азотом (0,8 л на 6 годин неперервної роботи).



Рисунок 2.10 – Інфрачервоний термограф із охолоджуваним рідким азотом фотоприймачем

Фокальні матриці інфрачервоних термографів виготовляють як функціонально закінчені фотоприймачі, що включають систему охолодження, підсилювачі, мультиплексор, коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів, аналого-цифровий перетворювач, блоки цифрової обробки і формувач

вихідних сигналів. Сигнали з виходу такого фотоприймача можуть передаватися на відеоконтрольній пристрій телевізійного типу або у цифровому вигляді в блоки цифрової обробки.

На рисунку 2.11 представлена структурна схема ІЧ-термографа із фокальною ІЧ- матрицею [35]. На схемі позначені такі основні блоки, вузли і елементи:

- ІЧО – ІЧ – об’єктив;
- М – матриця ІЧ-фотоприймачів;
- БО – блок охолодження;
- ДЖ – джерело живлення;
- ПП – попередній підсилювач;
- ТГ – тактовий генератор;
- МП – мультиплексор;
- АКНС – аналоговий коректор неоднорідності сигналів;
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
- ЦКНС – цифровий коректор неоднорідності сигналів;
- КНЕ –коректор елементів фотоприймачів матриці, що не працюють;
- БФЗ – блок формування зображення з мікропроцесорною обробкою відеосигналу;
- ЦВ – цифровий вихід для під’єднання до ПК;
- ТВМ – телевізійний монітор;
- ОС – окулярна система.

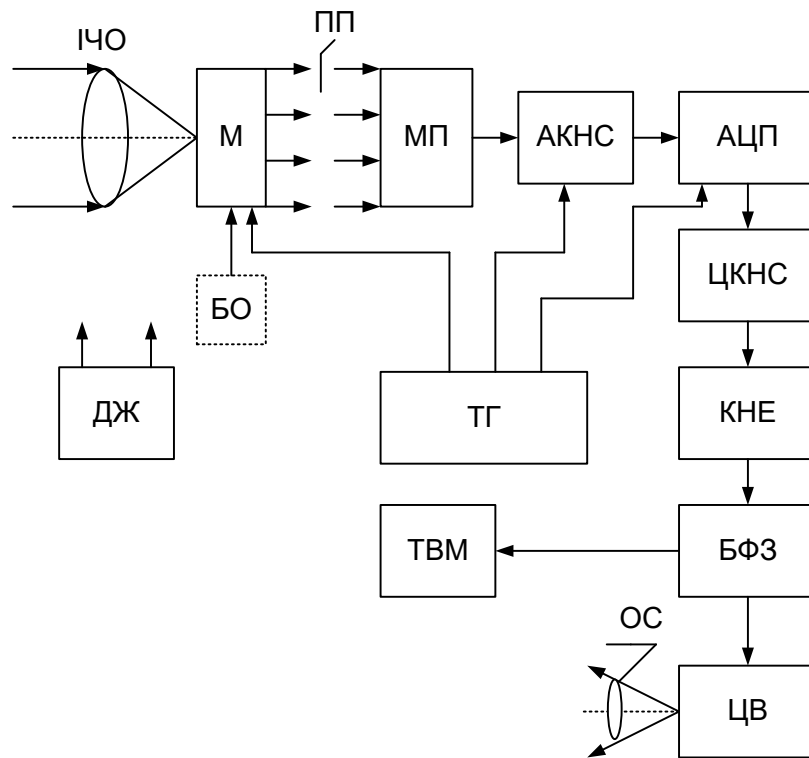


Рисунок 2.11 – Структурна схема тепловізора з фокальною матрицею

Стенд для вимірювання температурного поля сонячних елементів та ФЕСБ побудовано на основі інфрачервоного термографа, з'єданого із персональним комп'ютером (рис. 2.12). Термограф налаштовано на вимірювання температури в діапазоні 20 – 70 °С.

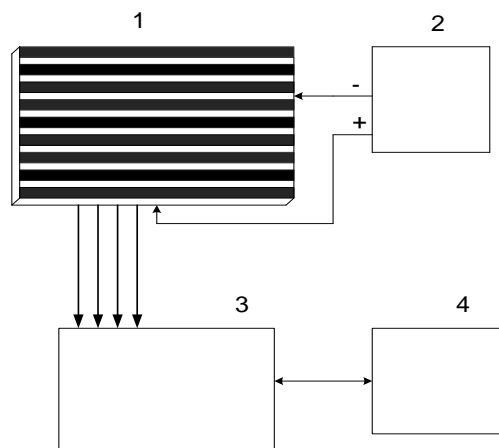


Рисунок 2.12 – Схема електрична структурна стенду для вимірювання температурного поля сонячних елементів та ФЕСБ; де 1 – сонячний елемент, 2 – лабораторний блок живлення, 3 – термограф, 4 – персональний комп'ютер

Оскільки сам термограф вдосконалювати неможливо, то вдосконалення засобу ІЧТ, яким є лабораторний стенд, відбувалось за такими двома напрямками:

- створення надійного і безпечного джерела живлення для нагрівання ФЕСБ зворотним темновим струмом;

- стабілізації струму нагрівання СЕ при нагріванні зворотним струмом для відтворення стаціонарного режиму при тепловому обміні СЕ із оточуючим середовищем.

Джерело живлення ФЕСБ темновим струмом розроблено спеціально для ІЧТ і має каскадну структуру. Подвійне гальванічне розв'язання силових каскадів схеми надає захист від короткого замикання та ураження персоналу. Крім того, передбачено заземлення корпусу, а також захист від перенавантажень.

Номінальні параметри джерела наступні:

- вихідна напруга від 400 до 1000 В;
- максимальна вихідна потужність 400 Вт.

Таким чином, від цього джерелом можна живити зворотним темновим струмом всі типи ФЕСБ, які представлені на сучасному ринку, зокрема, із номінальною потужністю 280-300 Вт. Живлення ФЕСБ, розрахованих на експлуатацію із вихідною напругою 24 та 48 В, також можлива від даного джерела, оскільки конструкція ФЕСБ дозволяє зовнішню комутацію окремих ланок СЕ по 12 В кожна.

При живленні СЕ зворотним темновим струмом виникає проблема стабілізації режиму нагрівання. Для вирішення цієї проблеми застосовано лабораторні джерела живлення типу БП-46, БП-47 та БП-48, які мають режим стабілізації як напруги, так і струму. Встановлено, що в процесі нагрівання СЕ темновий струм має велику чутливість до температури. Тому було використано режим стабілізації струму при нагріванні, оскільки нестабільність спожитої на нагрівання потужності при цьому є меншою в 3-5 раз ніж для режиму стабілізації напруги.

2.3. Вдосконалення алгоритму фільтрації зображень

Теорія алгоритмів та застосування цифрових фільтрів для фільтрації зображень [36] може бути використана при обробці інфрачервоних термограм СЕ та ФЕСБ з метою більш точного виділення на них дефектних зон із підвищеним виділенням тепла ("hot spots"). Розглянемо поширений метод лінійної фільтрації на основі рівнянь Вінера-Хопфа.

Нехай $x_{i,j}$ - значення яскравості зображення корисного сигналу на перетині -горядка та j-го стовпця, а спостережуване на вході фільтра

зображення описується моделлю:

$$y_{i,j} = f(x_{i,j}, n_{i,j}), i = \overline{0, I-1}, j = \overline{0, J-1} \quad (2.2)$$

Тут $n_{i,j}$ - значення перешкоди в точці з координатами (i, j) , f - функція, яка описує взаємодію сигналу і перешкоди, а I і J - відповідно число рядків і стовпчиків в кадрі.

Надалі будемо дотримуватися прийнятої при цифровій обробці зображень декартової системи координат з початком в лівому верхньому кутку кадру і з позитивними напрямками з цієї точки вниз і вправо. На рис.13 наведені приклади осередків різних типів, зображені у вигляді сукупностей точок. Центром осередків, робочою точкою, в якій здійснюється обробка, є точка з координатами i, j (на рис. 2.13 незакреслена).

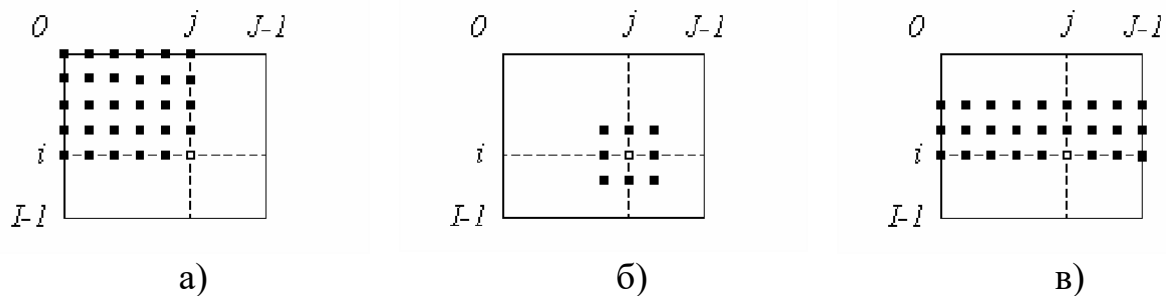


Рисунок 2.13 – Приклади осередків різних видів

Залежно від типу осередки розрізняють каузальну, некаузальну, і напівкаузальну фільтрацію зображень. Поняття каузальності (причинно-наслідкової залежності) пов'язують співвідношенням координат поточної точки i, j і точок, що входять до осередку.

Якщо обидві координати (номер рядка і номер стовпця) всіх точок осередків не перевищують відповідних координат поточної точки, то околиця і використовує її, обробка називаються каузальною. Приклад таких осередків представлений на рис. 2.13,а.

Деякі точки осередків, наведені на рис. 2.13,б, задовольняють принципу каузальності. Разом з тим, тут є і такі точки, обидві координати яких перевищують

відповідні координати робочої точки. Фільтрація, яка спирається на використання осередків з поєднанням таких властивостей, називається некаузальною.

Осередки, показані на рис. 2.13,в, відповідають напівкаузальній фільтрації. Одна з координат всіх точок осередків - в даному прикладі номер рядка - не перевищує відповідної координати робочої точки. Друга ж координата - в прикладі номер стовпця - у деяких точках також не перевищує відповідної координати робочої точки. Однак серед точок осередків є і такі, у яких ця друга координата перевищує відповідну координату робочої точки.

Сенс, закладений в цю класифікацію, полягає в тому, що, згідно з принципом причинності, на формування відгуку фізично здійсненого фільтра не можуть впливати елементи вхідного сигналу, що надійшли до моменту формування вихідного відліку. Цей принцип природним чином «працює» в динамічних системах, де всі процеси є тимчасовими процесами. При цифровій обробці зображень часто доводиться мати справу з раніше сформованими зображеннями, вже зберігаються в пам'яті пристрою обробки. У цьому сенсі співвідношення координат, строго кажучи, вже не відіграє такої важливої причинного ролі, як при обробці сигналів в реальному масштабі часу. Разом з тим, традиційно склалася описана вище класифікація процедур обробки зображень, якої, до певної міри, будемо дотримуватися і ми в подальшому викладі.

При лінійній фільтрації вихідний ефект визначається лінійною комбінацією вхідних даних:

$$x^*(i, j) = \sum_{(i_1, j_1)} \sum_{\in S} a(i_1, j_1) \cdot (i - i_1, j - j_1) \quad (2.3)$$

У цьому виразі $x^*(i, j) = x_{i,j}^*$ результат фільтрації корисного сигналу $x(i, j) = x_{i,j}$ в точці кадру з координатами (i, j) ;
 S - безліч точок (точніше- безліч їх координат);
 $a(i_1, j_1)$ – вагові коефіцієнти, сукупність яких являє собою двовимірну імпульсну характеристику.

Якщо область S кінечна, то імпульсна характеристика має кінцеву довжину і фільтр називається КІХ-фільтром. В іншому випадку імпульсна характеристика

має нескінченну довжину, а фільтр назву НІХ-фільтра. У натуральному прикладі (3.2) прийнято, що ІХ не залежить від координат точки (i, j) , в якій визначається вихідний ефект. Процедури обробки зображень, що володіють властивістю незалежності від координат, називаються *однорідними*.

Найбільш поширеним критерієм оптимальності, що застосовуються для оцінки якості обробки, є критерій мінімуму середнього квадрата помилок. Стосовно до фільтрації запишемо його вираження у вигляді:

$$E \left\{ \left[x(i, j) - \sum_{(l_1, j_1) \in S} a_{(l_1, j_1)} * y(i - l_1, j - j_1) \right]^2 \right\} = \min a(\cdot) \quad (2.4)$$

де $E\{\cdot\}$ - символ математичного очікування.

Згідно (2.4) відшукування оптимального фільтра полягає у визначенні його КІХ таким чином, щоб середній квадрат помилки $\varepsilon(i, j) = x(i, j) - x^*(i, j)$, що виражає відмінність між сигналом $x(i, j)$ і оцінкою $x^*(i, j)$, що формується фільтром, був мінімальним. Математичне сподівання обчислюється за всіма випадковим величинам, що містяться в (4), що означає орієнтацію критерію на облік середніх помилок.

Оптимізаційну задачу (2.4) неважно звести до вирішення рівняння або системи рівнянь. Для цього обчислимо похідну від лівої частини цього виразу за коефіцієнтом $a(k, l) = a_{k, l}$ і прирівняємо її нулю. З огляду на те, що операції диференціювання, підсумовування і математичного очікування є лінійними і тому перестановки, приходимо до виразу:

$$E\{x_{i, j} \cdot y_{i-k, j-l}\} = \sum_{i_1, j_1} \sum_{\in S} a_{i_1, j_1} \cdot E\{y_{i-i_1, j-j_1} - y_{i-k, j-l}\} \quad (2.5)$$

Присутні в ньому математичні очікування є, як неважно бачити, відліками кореляційних функцій, для яких введемо наступні позначення:

$$B_{x,y}(k, l) = E\{x_{i,j} \cdot y_{i-k, j-l}\}, \quad B_y(k - i_1, l - j_1) = E\{y_{i-i_1, j-j_1} - y_{i-k, j-l}\}$$

З їх урахуванням (2.5) прийме більш компактний вигляд:

$$B_{x,y}(k, l) = \sum_{i_1, j_1} \sum_{\epsilon S} a_{i_1, j_1} \cdot B_y(k - i_1, l - j_1) \quad (2.6)$$

Вважаючи авто кореляційну $B_y(o)$ і взаємно кореляційну $B_{xy}(o)$ функції відомими, помічаємо, що (2.6) являє собою лінійне щодо шуканих коефіцієнтів a_{i_1, j_1} рівняння алгебри. Число невідомих в цьому рівнянні дорівнює числу точок n_S середок S іє кінцевим в разі КІХ-фільтра.

Обмежимося розглядом КІХ фільтрації. Лінійне алгебраїчне рівняння з багатьма невідомими має безліч рішень. Якщо повторити диференціювання (4) по іншим n_S невідомим, то отримаємо ще n_S рівнянь, які відрізняються один від одного лівими частинами і коефіцієнтами в правих частинах, тому що визначають їх кореляції обчислюються кожен раз в різних точках. В результаті утворюється система n_S лінійних алгебраїчних рівнянь з n_S невідомими, звана в теорії фільтрація рівнянням Вінера-Хопфа:

$$\begin{cases} B_{x,y}(k, l) = \sum_{i_1, j_1} \sum_{\epsilon S} a_{i_1, j_1} \cdot B_y(k - i_1, l - j_1) \\ k, l \in S \end{cases} \quad (2.7)$$

Якщо дозволити її щодо всіх n_S невідомих a_{i_1, j_1} , то буде знайдена шукана імпульсна характеристика лінійного фільтру, що мінімізує середній квадрат похибок фільтрації.

Визначимо середній квадрат помилок оптимальної фільтрації. Для цього необхідно виконати зведення в квадрат у виразі (2.4) і врахувати в отриманому виразі рівняння Вінера-Хопфа (2.7). В результаті неважко отримати:

$$D_\varepsilon = D_x \left[1 - \sum_{i_1, j_1} \sum_{\in S} a_{i_1, j_1} \cdot R_x(i, j) \right] \quad (2.8)$$

Зупинимося на аналізі зміни середньої яскравості зображення при його фільтрації. Обчисливши математичне очікування від обох частин (2.8), знаходимо:

$$m_{x^*} = m_y \cdot \sum_{i_1, j_1} \sum_{\in S} a(i_1, j_1) \quad (2.9)$$

Тут прийнято, що середня яскравість m_y вхідного зображення $y(\circ)$ не залежить від координат, і як результат, отримано, що і середня яскравість m_x вихідного зображення $x(\circ)$ також постійна в усіх точках кадру. Дуже часто при обробці прагнуть зберегти середню яскравість зображення. Як впливає з отриманого виразу, досягти цього вдається при виконанні рівності

$$\sum_{(i_1, j_1)} \sum_{\in S} a(i_1, j_1) = 1, \quad (2.10)$$

яке є додатковою вимогою до імпульсної характеристики фільтра.

Тому оптимізаційну задачу (2.4) необхідно вирішувати з урахуванням даного обмеження типу рівності.

Замість цього часто перед фільтрацією здійснюють віднімання середньої яскравості m_y з вхідного зображення. Як впливає з (2.9), середнє значення яскравості на виході фільтра при цьому також дорівнює нулю незалежно від властивостей імпульсної характеристики. Це дозволяє вирішувати систему рівнянь (2.7), ігноруючи перетворення середньої яскравості. Бажане ж її значення відновлюється після фільтрації простим додаванням до вихідного ефекту.

Розробка алгоритму фільтрації зображень на основі методу Кенні наведена в численних працях, зокрема, в [37-40]. Як зазначають ці автори, головною частиною алгоритму є градієнтний пошук пікселів, які належать до границь об'єкту (Рис. 2.14).

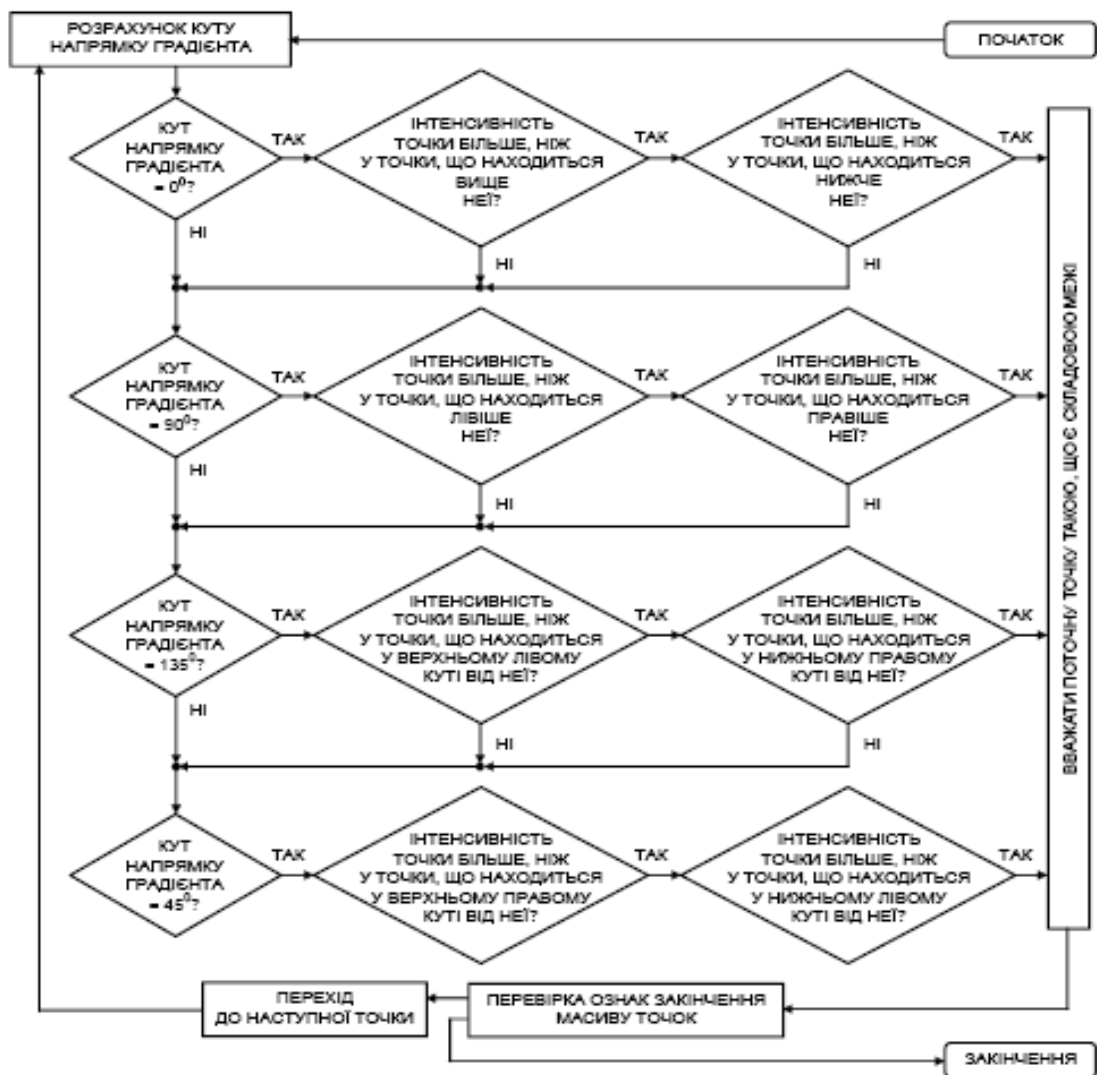


Рис. 2.14. – Алгоритм пошуку граничних пікселів як складова фільтру Кенні

На нашу думку, алгоритм, наведений на рисунку 2.14, не в повній мірі відображає контурну фільтрацію за методом Кенні. Тому нами запропоновано загальний алгоритм контурної обробки зображень (Рис. 2.15), який можна реалізувати в різних системах графіки, зокрема при реалізації основних функцій обробки в ручному режимі.



Рис.2.15 – Узагальнений алгоритм контурної фільтрації термограм за методом Кенні

Зазначимо, що дуже важливим елементом обробки термографічних зображень є попередня обробка за допомогою гістограми. При цьому область дефекту або надлишкового виділення тепла на загальному тепловому полі виділяється певним кольором в заздалегідь визначеному температурному діапазоні.

2.4. Розрахунок теплової потужності дефектної зони

Метод перевірки шляхом пропускання зворотного темнового струму застосовують також при вихідному контролі ФЕСБ в умовах виготовлення. Даний метод називається PID (Power induced Test).

В ході проведених досліджень [41] в лабораторії кафедри НАЕПС були відтворені умови PID тесту для ФЕСБ з метою термографічного контролю дефектів по локальним неоднорідностям температурного поля її поверхні. На рис. 2.16 наведено термограму ФЕСБ з полікристалічного кремнію, потужністю 60 Вт.

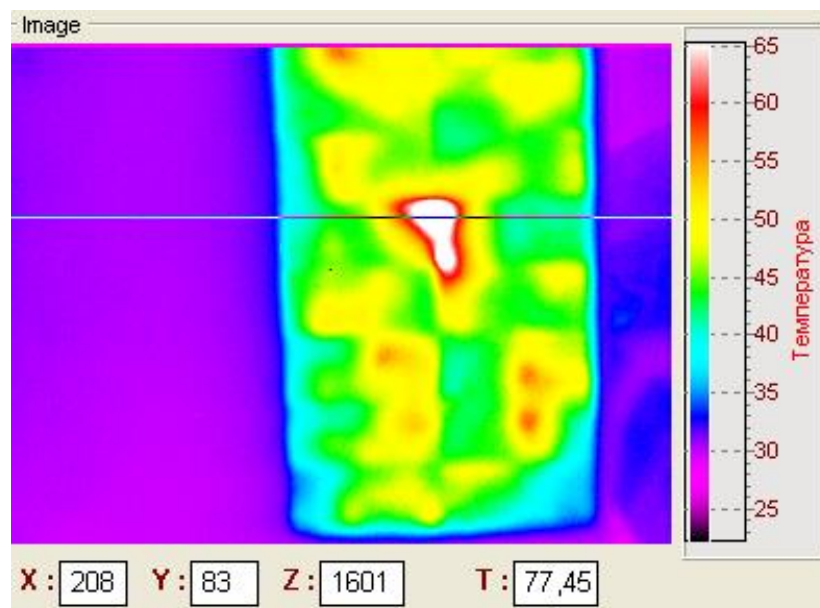


Рисунок 2.16 – Термограма ФЕСБ: матеріал – полікристалічний кремній; номінальна потужність 60 Вт; підключена половина ФЕСБ; напруга 670 В; темновий струм 170 мА; максимальна температура в центрі зони дефекту становить 77,45°С; границя жовтий-зелений має температуру 46°С; границя білий-червоний - 63°С

За допомогою програми Teplovisio була визначена роздільна здатність термографу за координатами X,Y (розмір пікселя). Ширина нагрітої частини ФЕСБ становить 305 мм, на котрі припадає 152 пікселя . Таким чином, один піксел відображає квадрат з розмірами 2мм x 2 мм.

Далі термограма була збільшена програмою Paint.Net та підготовлена для подальшої попиксельної обробки (рис. 2.17). Обробка зображення в графічному

редакторі показала, що дефект насправді має складну структуру та складається з двох відмінних за величиною областей.

Контурна фільтрація зони перегрівання (Defect area) дозволила відкинути хибні пікселі і зменшити похибку вимірювання геометричних розмірів на 2%, площі і теплової потужності - на 3%

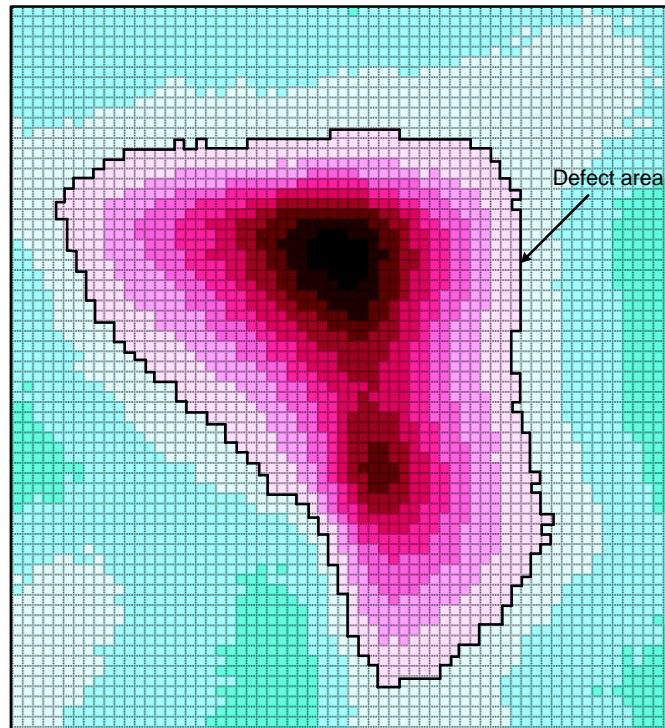


Рис. 2.17 – Зона дефекту ФЕСБ після контурної фільтрації: збільшення 800%; градація температур по відтинкам пікселів з кроком 3 °С; границя білий-блакитний має температуру 54 °С.

Пікселі зони дефекту були відсортовані по абсолютній середній температурі для кожного відтинку: T_i – середня температура в підзоні з номером i в Кельвінах; N_i – кількість пікселів в i -тій підзоні. Розподіл пікселів за температурою наведено в таблиці 1.

Таблиця 2.1 – Розподіл пікселів по температурним областям зони дефекту

i	1, біл.	2	3	4	5	6	7	8	9, чорн.
T_i, K	328,5	331,5	334,5	337,5	340,5	343,5	346,5	349,5	352,5
N_i	504	326	224	169	150	122	73	43	27

Баланс теплової потужності забезпечується стаціонарним характером теплообміну між нагрітою темновим струмом ФЕСБ та оточуючим середовищем.

Стаціонарність процесу досягнута постійною величиною електричної потужності, що прикладається до ФЕСБ протягом тривалого часу (20 хвилин). Прикладена потужність дорівнює потужності теплового потоку від ФЕСБ до оточуючого середовища (повітря в лабораторії, де проводяться вимірювання).

Прикладена електрична потужність дорівнює:

$$P = 670 \text{ В} \cdot 0,17 \text{ А} = 114 \text{ Вт}.$$

Вся прикладена потужність перетворюється в теплову потужність ФЕСБ. Площа S нагрітої частини ФЕСБ складає половину загальної її поверхні і дорівнює: $S = 61 \cdot 30,5 = 1860,5 \text{ см}^2$.

Середня густина теплового потоку ФЕСБ $\rho = P/S$; $\rho = 61,2 \text{ мВт/см}^2$. Потужність сонячного випромінювання, відповідає стандарту АМ1.5 дорівнює 100 мВт/см^2 , що має значення, наближене до умов описаного експерименту.

Визначимо теплову потужність дефекту як таку, що локалізована в зоні з густиною теплової потужності, яка перевищує середню густина для нагрітої частини ФЕСБ. При цьому розрахунок виконаємо для різниці температур: температури пікселя зони дефекту та середньої температури нагрітої зони ФЕСБ, яка в експерименті складає 47°C (320 К).

Баланс теплообміну дефекту складають три механізми: теплопровідність, конвекція та радіаційне випромінювання. Перша компонента враховується автоматично, оскільки ми збільшуємо зону дефекту (теплова пляма «розповзається» в горизонтальній площині). Розрахунок проводимо для лицевої поверхні. Загальний тепловий потік дефекту повинен враховувати і теплообмін тильного боку ФЕСБ, тому в кінці розрахунку необхідно подвоїти отримане значення (вважаємо, що тепловий потік ФЕСБ симетричний відносно площини розділу лицевого та тильного боку).

Конвекційна компонента додаткового теплового потоку, що генерується дефектом, при конвекційному теплообміні [42] дорівнює:

$$q_c = h_c S (T_d - T_1), \quad (2.11)$$

де T_d – температура в зоні дефекту;

T_1 – середня температура нагрітої частини ФЕСБ;

S – площа зони дефекту;

h_c – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі від скла до повітря; ; $h_c = 5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ [4].

Радіаційна компонента [42] додаткового теплового потоку, що генерується дефектом, дорівнює:

$$q_r = \sigma S \varepsilon (T_d^4 - T_1^4), \quad (2.12)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴ – стала Стефана-Больцмана;

ε – коефіцієнт чорноти скла; $\varepsilon = 0,937$ [42].

Загальну потужність дефекту виразимо як суму елементарних дефектів, що мають розмір одного пікселя та забезпечуючи конвекційний та радіаційний механізми теплообміну з оточуючим середовищем:

$$P_d = \sum_i (q_c^i + q_r^i) N_i, \quad (2.13)$$

Площа пікселя $S = 4 \cdot 10^{-6}$ м². В таблиці 2 надано зведені результати розрахунків теплових потоків пікселів з різною температурою у відповідності з формулами (2.12), (2.13).

Таблиця 2.2 – конвекційний та радіаційний потоки для груп пікселей

T _i , К	328,5	331,5	334,5	337,5	340,5	343,5	346,5	349,5	352,5
q _c ⁱ , мВт	0,17	0,23	0,29	0,35	0,41	0,47	0,53	0,59	0,65
q _r ⁱ , мВт	0,246	0,338	0,432	0,529	0,628	0,73	0,835	0,942	1,053
q _c ⁱ +q _r ⁱ , мВт	0,416	0,558	0,722	0,879	1,038	1,2	1,365	1,632	1,703

Сумарний тепловий потік зони дефекту чільного боку ФЕСБ знаходимо як суму потоків всіх пікселей за відповідною формулою (2.13) та даними таблиць 2.1 та 2.2:

$$P_d = 1220 \text{ мВт.}$$

Після подвоєння величини теплового потоку з метою врахування тильного боку ФЕСБ маємо:

$$P_d^{\text{full}} = 2P_d = 2,44 \text{ Вт.}$$

Перевіримо баланс теплової потужності Q ФЕСБ при її нагріванні темновим струмом. Враховуючи симетричне відведення тепла від чільного та тильного боків ФЕСБ маємо:

$$Q = 2(Q_c + Q_r), \quad (2.14)$$

Конвекційна компонента теплового потоку ФЕСБ:

$$Q_c = h_c S_1 (T_1 - T_0), \quad (2.15)$$

де $S_1 = 0,186 \text{ м}^2$ – площа нагрітої частини ФЕСБ;

$T_0 = 293 \text{ К}$ – температура повітря в лабораторії під час проведення експерименту.

$$Q_c = 5 \cdot 0,186(320 - 293) = 25,1 \text{ Вт.}$$

Радіаційна компонента:

$$q_r = \sigma S_1 \varepsilon (T_1^4 - T_0^4) \quad (2.16)$$

$$q_r = 30,8 \text{ Вт.}$$

Тоді загальний тепловий потік ФЕСБ:

$$Q = 2(25,1 + 30,8) = 111,8 \text{ Вт.}$$

Отримане значення загального теплового потоку ФЕСБ дуже близьке до значення прикладеної електричної потужності, що дорівнює 114 В. Відносна похибка розрахованої величини складає 1.9%.

Дефект, займаючи малу область ФЕСБ, може бути причиною значного локального перегріву (до $77 \text{ }^\circ\text{C}$) в порівнянні з середньою температурою ($45 \text{ }^\circ\text{C}$). При цьому тепла потужність дефекту порівняно невелика (2.44 Вт на фоні 114 Вт прикладеної до ФЕСБ електричної потужності або 2% від підведеної потужності).

2.5. Аналіз похибок вимірювання геометричних розмірів зображень на прикладі електролюмінісцентних дефектів

Електролюмінісцентні дефекти (ЕЛД) фотоелектричних СЕ раніше досліджені за допомогою ТІВС і представлені в роботах [43 – 44].

Зовнішній вигляд ЕЛД на екрані монітору наведено на рис. 2.18



Рис. 2.18 – Парний ЕЛД СЕ: збільшення у 50 раз, відстань між дефектами 200 мкм

Вважаємо, що форма ЕЛД наближена до круга і тому задачу вимірювання його геометричних розмірів зводимо до задачі вимірювання діаметру ЕЛД.

Вважаємо нерівномірність чутливості СЕП скомпенсованою і для визначення середнього квадратичного відхилення результату вимірювання координат лівої σ_l та правої σ_p меж ЕЛД скористуємось формулою:

$$\sigma_l = \sigma_p = \sqrt{\sigma_{ш}^2 + \sigma_{ацп}^2 + \sigma_M^2}, \quad (2.17)$$

де $\sigma_{ш}$, $\sigma_{ацп}$, σ_M — складові, обумовлені флуктуаціями яскравості ЕЛД, шумом АЦП та методикою визначення координати, відповідно.

Методика оцінки внеску вказаних складових в похибку вимірювання координати межі контрастних ділянок базується на умові, що координата належить до перехідної області.

Для оцінки внеску складових $\sigma_{ацп}$ і σ_M в похибку вимірювання діаметру ЕЛД скористаємось результатами роботи [45], в якій наведено такі значення: $\sigma_{ацп} = 0.29\Delta_{ріх}$, $\sigma_M = 0.29\Delta_{ріх}$, де $\Delta_{ріх}$ — лінійний розмір пікселя вздовж відповідної координати.

Ці результати отримані за наступних припущень. По-перше, формування сигналу ПЗЗ-матриці характеризується малими втратами переносу зарядів.

По-друге, методична похибка вимірювання координати обумовлюється характером зміни яскравості перехідної області. При цьому перехідна область, тобто область, на якій задані координати відрізка, є лінійною функцією яскравості (рис. 2.19).

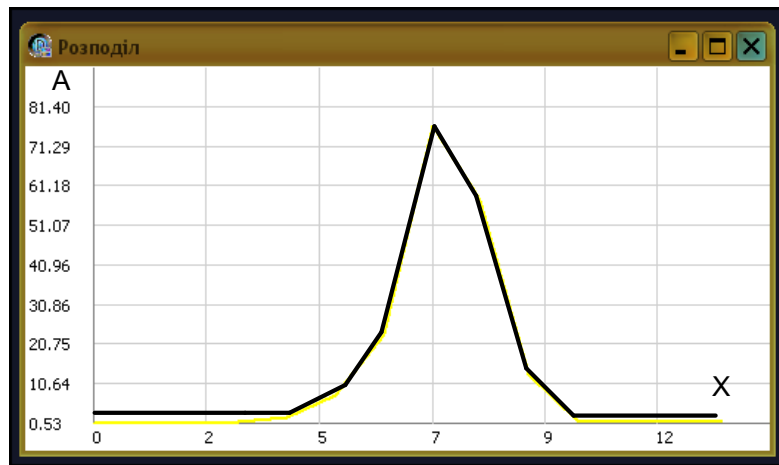


Рис. 2.19 – Зміни сигналу ТІВС на межах ЕЛД: масштаб 5 мкм/піксель

Середнє квадратичне відхилення при вимірюванні координати, яке обумовлене флуктуаціями яскравості, в [46] оцінюється наступною формулою:

$$\sigma_{ш} = 2\tau_{тр}/q ,$$

де q — відношення сигналу до шуму в зображенні,

$\tau_{тр}$ — тривалість відеосигналу перехідної області.

Врахуємо деякі особливості задачі вимірювання діаметру ЕЛД. По-перше, сигнал, який може бути сформований пікселем на межі ЕЛД, змінюється від A_0 до значення $A_{ЕЛД}$.

По-друге, значення q будемо визначати, запровадивши обмеження сигналу на рівні A_0 , тобто $q=A_{ЕЛД}-A_0/\sigma_0$, де σ_0 —середньоквадратичне значення шуму в зображенні фрагменту поза межами ЕЛД.

Значення $\tau_{тр}$, A_0 , $A_{ЕЛД}$, q , σ_0 визначались нами експериментально. Наприклад, згідно з рис. 2.19 $\tau_{тр} = 2\Delta_{ріх}$; $A_{ЕЛД} = 75$; $A_0 = 0,53$; $A_c = 74,4$ ум.од. (сигнал $A_c = A_{ЕЛД} - A_0$), $\sigma_0 = 0,2$; $q = 72,35$. Отже, згідно з формулою $\sigma_{ш} = 0,06\Delta_{ріх}$.

Після підстановки значень $\sigma_{ш}$, $\sigma_{ашп}$, σ_m в формулу, отримаємо $\sigma_l = 0,42\Delta_{ріх}$.

Вважаємо, що при вимірюванні геометричних параметрів телевізійних зображень відхилення координат відрізків, а отже і їх розмірів від середніх значень, розподілені за нормальним законом. Тому середньоквадратичне відхилення при вимірюванні діаметру ЕЛД:

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_{ш}^2} = \sqrt{2}\sigma_l.$$

Прийнявши імовірність правильного рішення рівною 0.95, отримаємо, що похибка визначення діаметру ЕЛД становитиме $\Delta D = 2\sigma_D$.

Якщо лінійний розмір пікселя ТЗВ $\Delta_{\text{ріх}}=5$ мкм, то $\sigma_{\text{л}}=2$ мкм, $\sigma_{\text{D}}=4$ мкм, а похибка вимірювання діаметру ЕЛД в площині СЕП $\Delta D=8$ мкм. Згідно з розділом 1 така точність не може вважатися достатньою при вимірюванні діаметра ЕЛД, і вже зовсім не відповідає сучасним вимогам до точності визначення геометричних параметрів дефектів.

З метою підвищення точності визначення геометричних розмірів ЕЛД необхідно визначити кількість ділянок, які можуть бути розрізнені в межах пікселя як окремі:

$$N = (A_{\text{ЕЛД}} - A_0)/3,2\sigma_0$$

Таким чином, виходячи з оцінки сигналів, які формуються на ЕЛД, можна стверджувати, що в межах пікселя із заданою імовірністю, в даному випадку 0.95, можна розрізнити N ділянок. З цього випливає, що при лінійному розмірі пікселя $\Delta_{\text{ріх}}$ можлива ідентифікація положення межі ЕЛД з точністю до ділянки розміром $\Delta_{\text{ріх}}/N$.

Безумовною перевагою розглянутого вище підходу є те, що ефект може бути досягнений в межах існуючої структури приладу за рахунок вдосконалення методики визначення положення межі ЕЛД.

Згідно з процедурою деталізації після знаходження діаметру ЕЛД (в цілих значеннях піксель) сигнал, сформований крайніми пікселями, співставляється з визначеними рівнями квантування і відноситься до одного з них. Це приводить до підвищення точності вимірювання діаметру ЕЛД.

Наприклад, згідно з базовою методикою встановлено, що зображення лівої межі ЕЛД проходить через піксель $(i; j)$, а правої — через піксель $(i; k)$ (рис. 2.20).

Діаметр ЕЛД обчислюється за формулою:

$$D_1 = X_{i,k} - X_{i,j} ,$$

де X_{ik} , X_{ij} — координати піксель $(i; j)$, $(i; k)$.

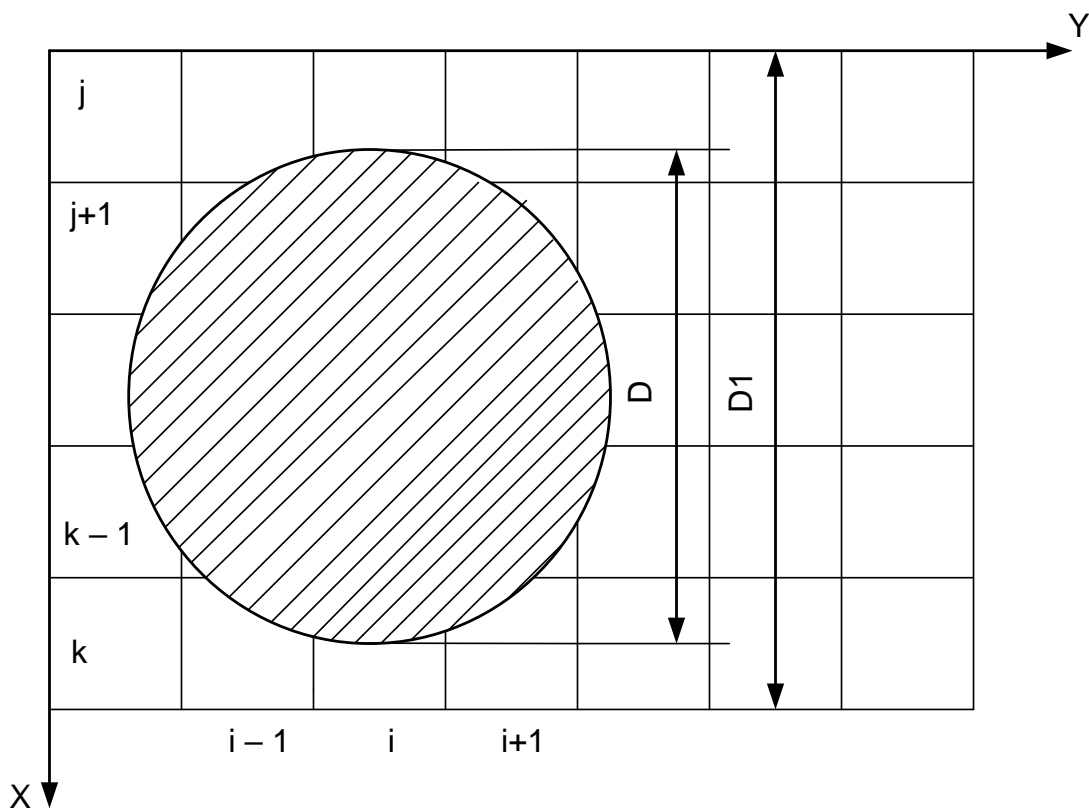


Рис. 2.20 – Визначення діаметру ЕЛД

Оскільки лінія межі ЕЛД може довільно перетинати піксель, то максимальна абсолютна похибка визначення координати ΔX дорівнює розміру пікселя $\Delta_{\text{ріх}}X$ вздовж цієї координати. У відповідності з максимальна абсолютна похибка вимірювання діаметру зображення ЕЛД:

$$\Delta D = 2\Delta X = 2\Delta_{\text{ріх}}X$$

У відповідності з процедурою деталізації діаметр ЕЛД визначається за формулою:

$$D = (X_{i,k-1} - X_{i,j+1}) + (\Delta_{\text{ріх}}X/N)(l_k + l_j),$$

де l_k, l_j – кількість ділянок розміром $\Delta_{\text{ріх}}X/N$, які займає зображення ЕЛД в межах пікселя $(i;k)$ та пікселя $(i;j)$ відповідно.

Застосування процедури деталізації дозволяє зменшити похибку визначення координати, оскільки в формулі та в формулах для визначення $\sigma_{\text{ш}}$, $\sigma_{\text{ащп}}$, $\sigma_{\text{м}}$ використовується не $\Delta_{\text{ріх}}X$, а $\Delta^l_{\text{ріх}}X = \Delta_{\text{ріх}}X/N$.

При $N = 3$ та масштабі зображення 5 мкм/піксель похибку вимірювання координати ЕЛД зменшено з 5 мкм (півпікселя) до 1,7 мкм.

На нашу думку, за аналогією, також можливе зменшення похибки вимірювання геометричних розмірів теплового поля дефекту в методі ІЧТ, якщо застосувати метод обробки зображення, аналогічний до описаного вище.

На захист даної тези можна навести такі аргументи:

- засоби телевізійного контролю та ІЧТ, які були використані в дослідженнях дефектів ФЕСБ, мають в основі матрицю фото-чутливих елементів, які відрізняються робочим діапазоном: видимого або інфрачервоного випромінювання;
- беручи до уваги попереднє твердження, маємо в результаті, що алгоритм визначення границь зображень ЕЛД, який був застосований в ТІВС, можна застосувати також при вимірюванні границі теплового поля дефекту ФЕСБ.

Вимірювання геометричних розмірів об'єктів різної природи для матричних засобів реєстрації зображень у різних діапазонах електромагнітних хвиль (інфрачервоному, видимому та інших) із величиною похибки, яка є меншою, ніж один піксел, на основі застосування відповідного алгоритму є окремою науковою задачею, яка значно перевершує завдання даного дисертаційного дослідження.

2.6. Експериментальні дані з контурної фільтрації термографічних зображень

Широко відомі результати використання ІЧТ в медицині. Останнім часом тут велику увагу приділено контурній фільтрації термографічних зображень [47 – 49].

Градiєнтний метод видiлення контурiв застосовано нами при обробцi термограми обличчя, яка була отримана в лабораторiї неiнвазивної дiагностики НТУУ «КПШ iм. I. Сiкорського» (Рис. 2.21).

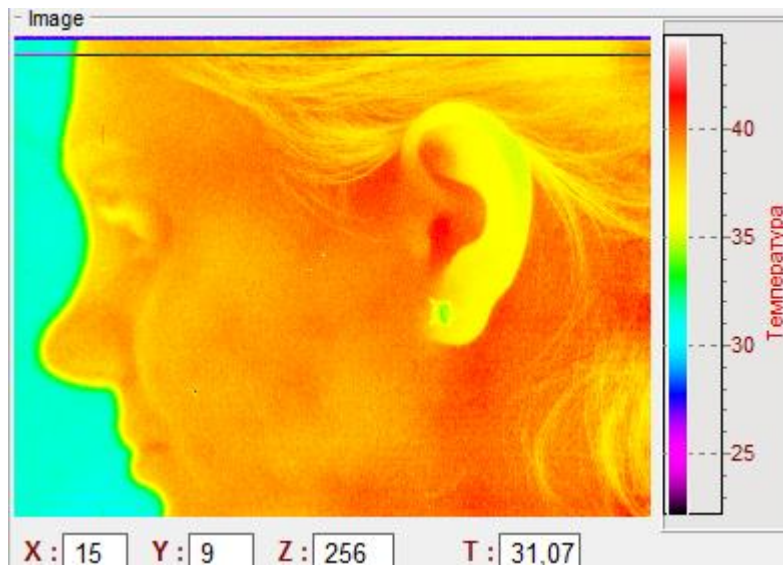


Рис. 2.21 – Термограма обличчя із осередками локального перегрівання в зоні вушної раковини

Контурна фільтрація реалізована в програмі Paint.NET. Кут градієнтного пошуку при цьому дорівнював 45 град. (Рис. 2.22).

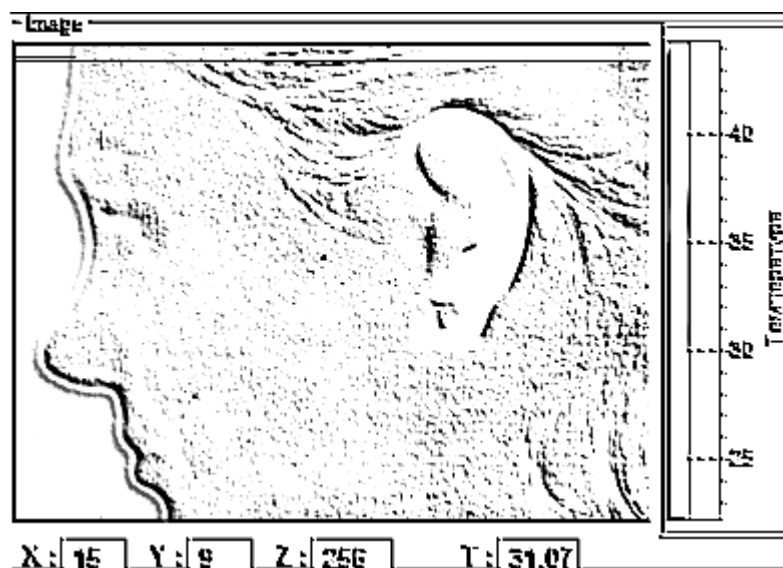


Рис. 2.22 – Виділення контурів програмою Paint.NET (монохромний режим)

Для забезпечення порогової фільтрації (відповідно до методу Кенні), яка дозволяє запобігти появі подвійних ліній, нами проведено зміну кута з 45 на 135 градусів і виконане повторне визначення контуру градієнтним методом (Рис. 2.23).

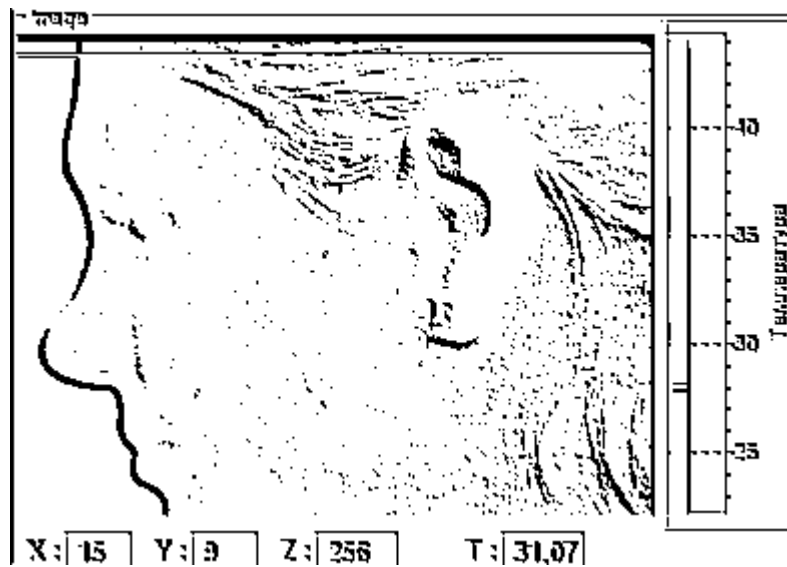


Рис. 2.23 – Контурна фільтрація при градієнтному куті 135 град.

Нами проведено дослідження термограм СЕ із застосуванням методів контурного аналізу, основні результати яких наведено в [50-51].

Встановлено, що використання монохромного режиму забезпечує покращене виділення контурів на відміну від кольорового режиму (Рис. 2.24).

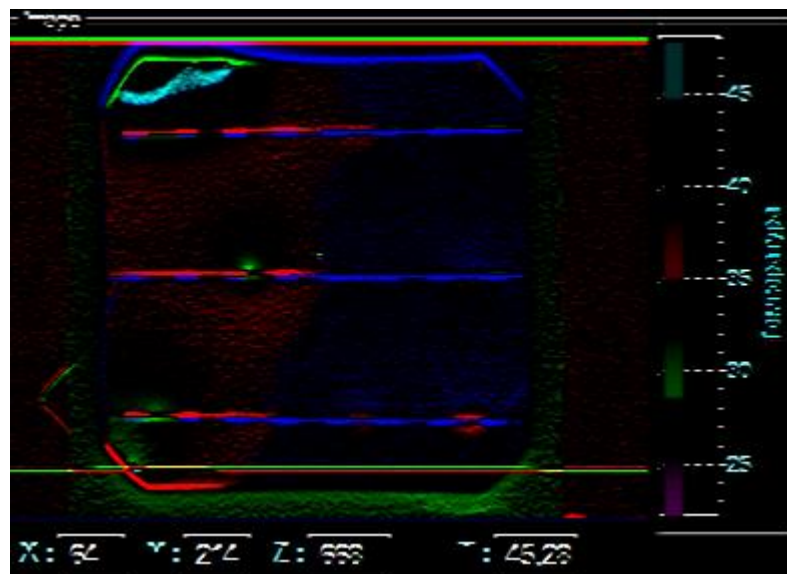


Рис. 2.24 – Виділення контурів теплового поля сонячного елемента при нагріванні темновим зворотним струмом: кут градієнту дорівнює -90град.; струм 0,5 А.

Вихідне термографічного зображення СЕ при його нагріванні темновим зворотним струмом, наведене на рис. 2.25.

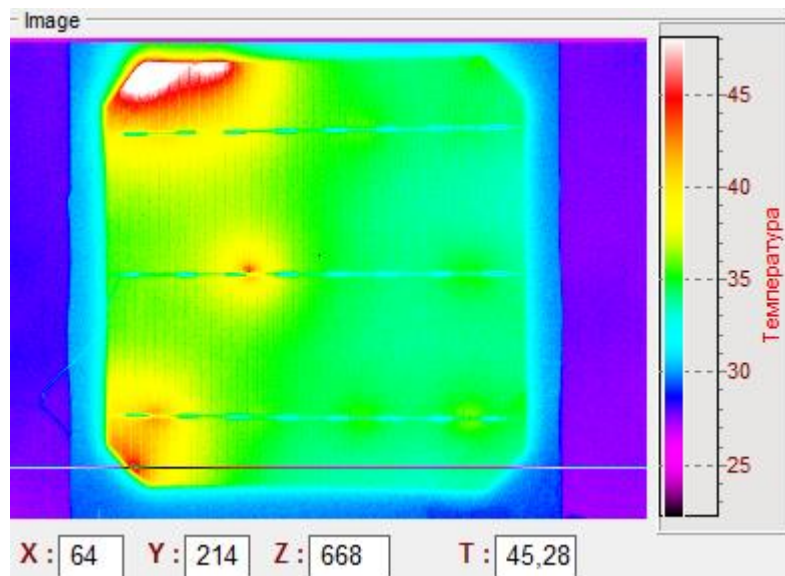


Рис. 2.25 - Теплове поле СЕ, отримане методом ІЧТ: нагрівання 300 секунд при зворотному струмі 0,5 А

Після виділення контурів, нами виконувалась операція інвертування кольорів, яка дещо покращувала розпізнання зони дефекту (Рис. 2.26).

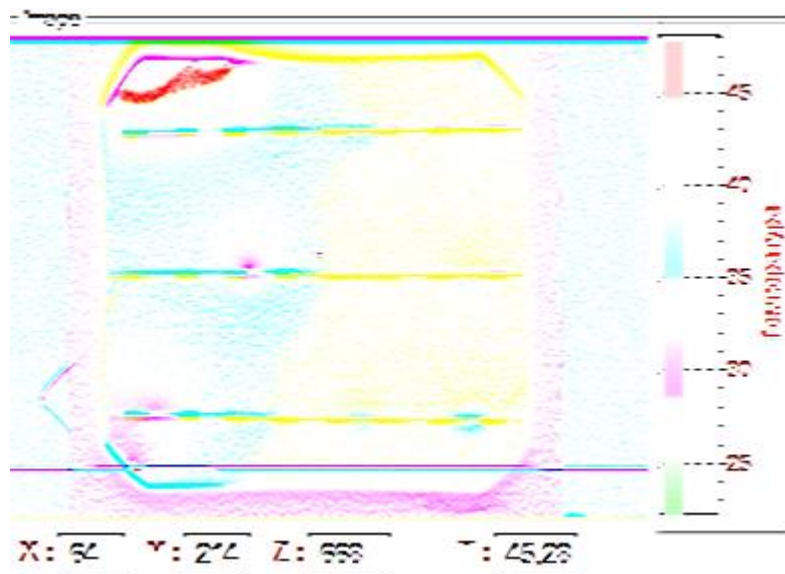


Рис. 2.26 - Інвертування кольорів при контурній обробці зображення СЕ, отриманого методом ІЧТ

Монохромний режим забезпечує, як вже було зазначено вище, краще виділення границь (Рис. 2.27).

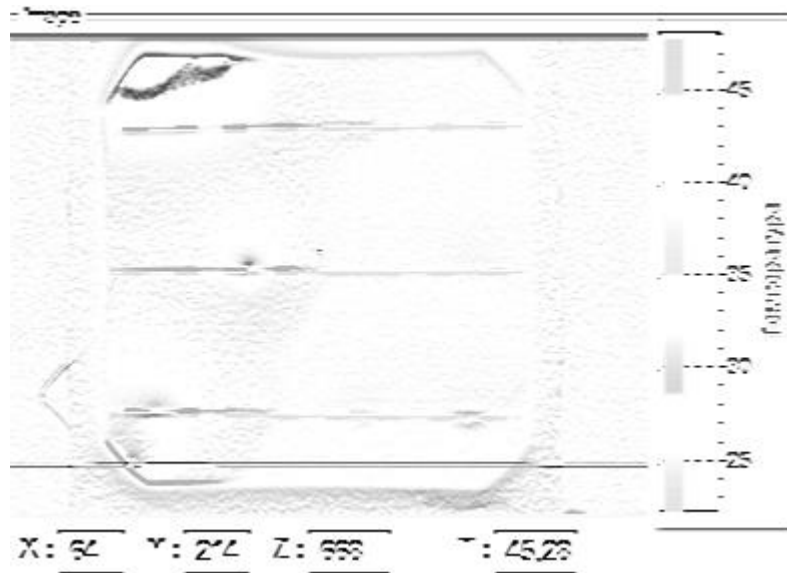


Рис. 2.27 - Монохромне зображення контурів

Для більш різкого виділення контуру нами застосовано подвійну порогову фільтрацію (режим збільшення різкості). Результат цієї операції наведено на рис. 2.28.

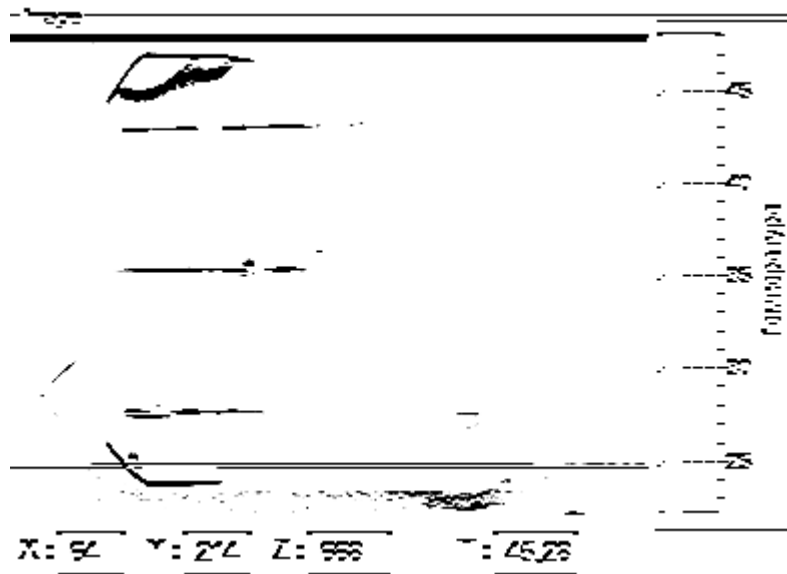


Рис. 2.28. – Подвійна фільтрація регулюванням яскравість/контраст

Для отримання стаціонарного теплового режиму нами було застосовано живлення СЕ від зовнішнього джерела в режимі стабілізації струму. Залежність напруги від часу наведено на рис. 2.29.

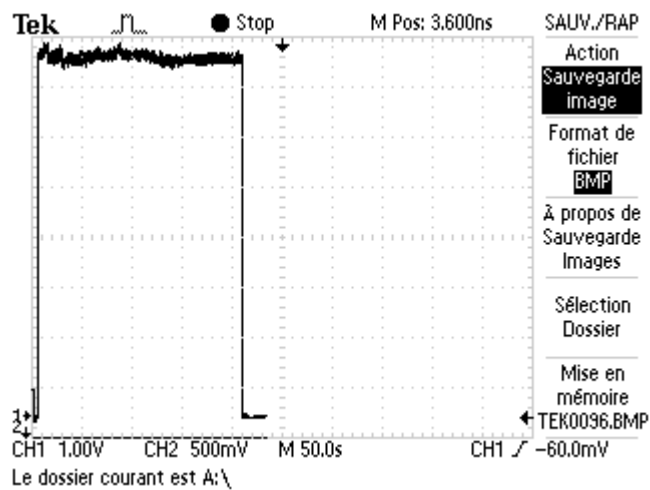


Рис. 2.29 – Осцилограма напруги в режимі стабілізації струму 0,5 А при нагріванні СЕ

Профіль нагрівання відповідає осцилограмі напруги і свідчить про стаціонарний характер теплового обміну нагрітого теплом Джоуля СЕ із навколишнім середовищем. Нестабільність процесу нагрівання можна оцінити за не лінійністю графіка, яка не перевищує 2%, що цілком задовольняє вимогам експерименту.

Етапи обробки термографічного зображення зони дефекту СЕ наведено на рисунках 2.30 – 2.35.

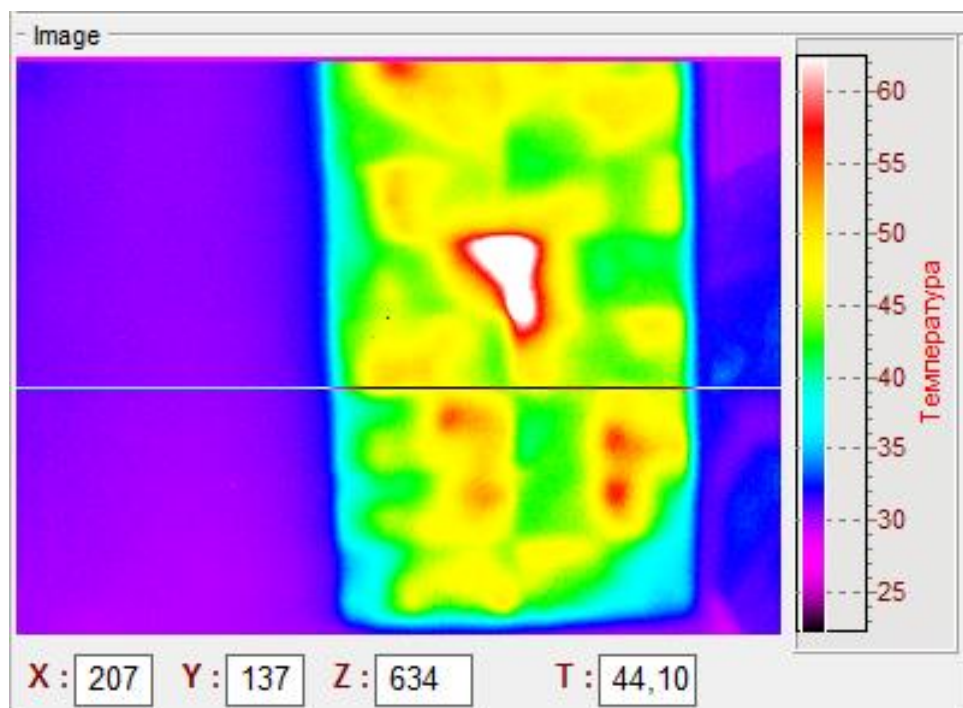


Рис. 2.30 – Отримання термограми ФЕСБ: зображення піддали гістограмній обробці

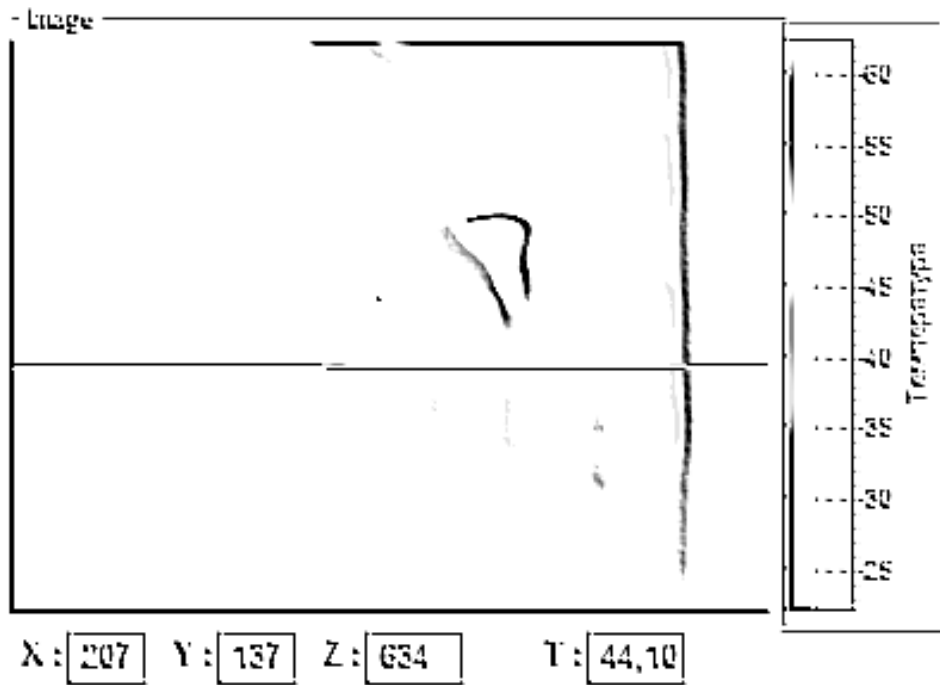


Рис. 2.31 – Виділення контуру зони перегрівання при куті градієнта +45 град

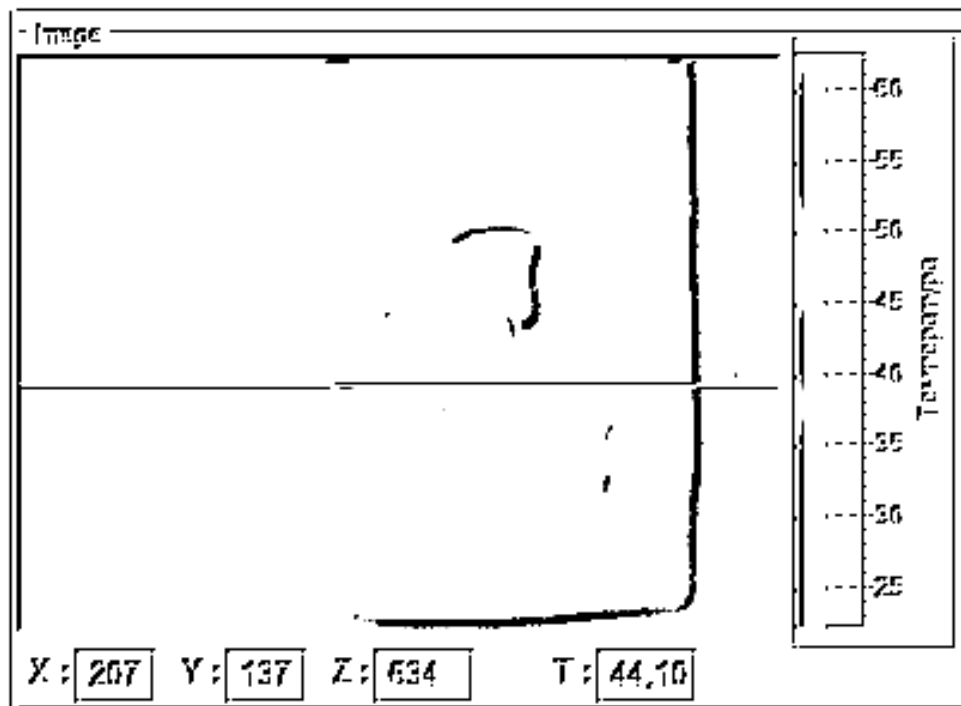


Рис. 2.32 – Виділення контуру зони перегрівання при куті градієнта -45 град

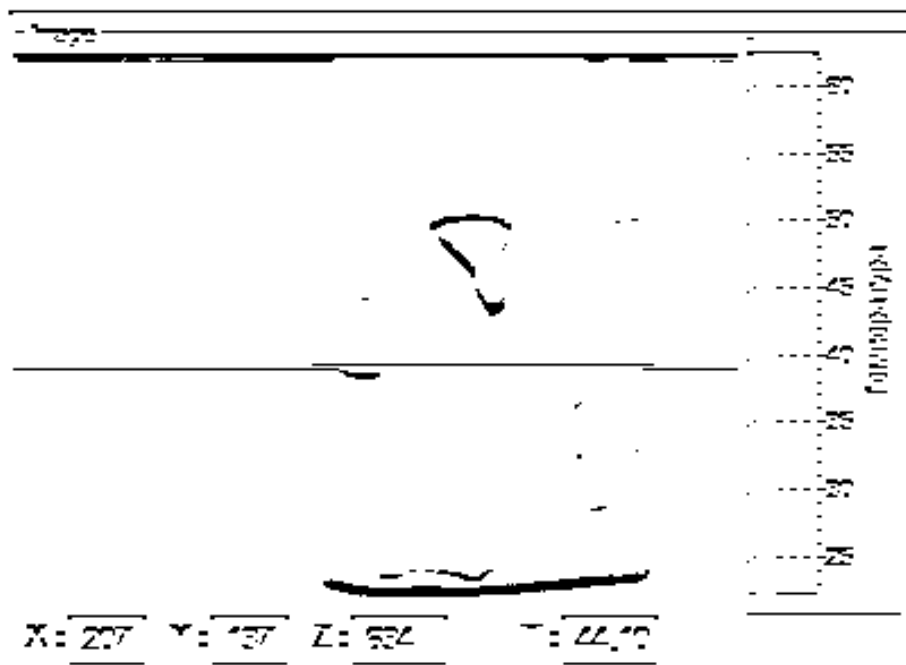


Рис. 2.33 – Виділення контуру зони перегрівання при куті градієнта -90 град.



Рис. 2.34 – Накладання другого і третього контурів -45 і -90 град.

Аналогічний процес для локалізованого і збільшеного в масштабі 5:1 зображення дефектної зони наведено на рис. 2.35 – рис. 2.39.

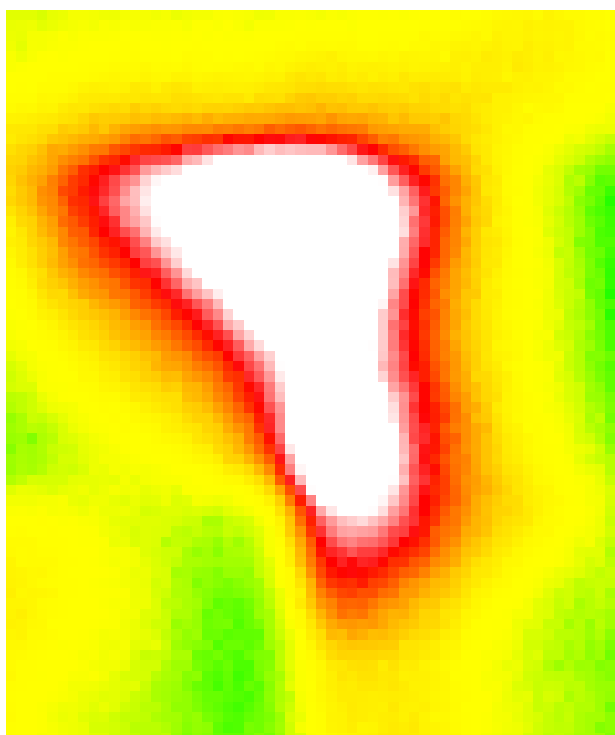


Рис. 2.35 – Гістограмна обробка: границя білий-червоний відповідає 60 град.
за Цельсієм

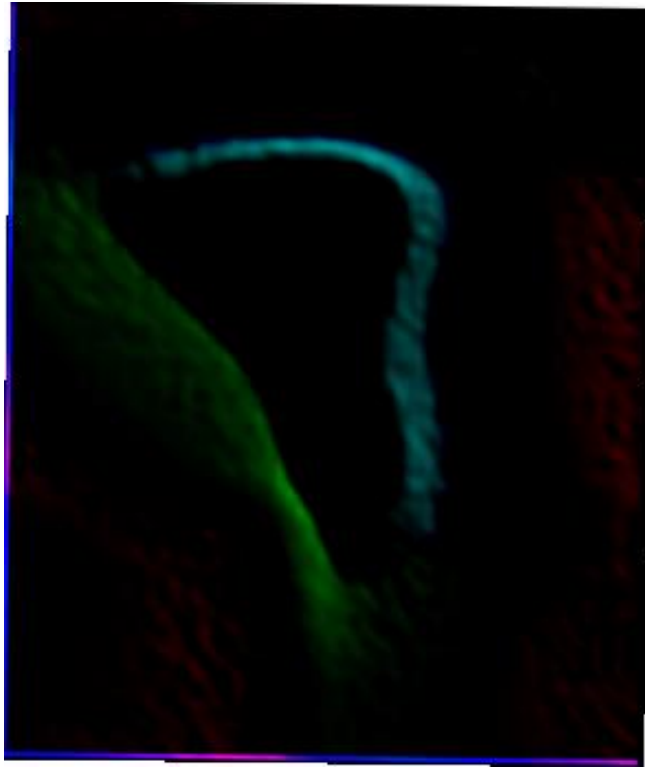


Рис. 2.36 – Виділення контуру зони дефекту СЕ



Рис. 2.37 – Монохромне зображення контуру зони дефекту СЕ: градієнт
+45 град.



Рис. 2.38 – Порогова фільтрація контуру зони дефекту СЕ: градієнт +45 град; різкість +20



Рис. 2.38 – Порогова фільтрація контуру зони дефекту СЕ: градієнт -45 град; різкість +20

Для точного визначення меж зони дефектів на основі термограм теплових полів СЕ та ФЕСБ використовують також метод осцилограм (Рис. 2.39 та 2.41).

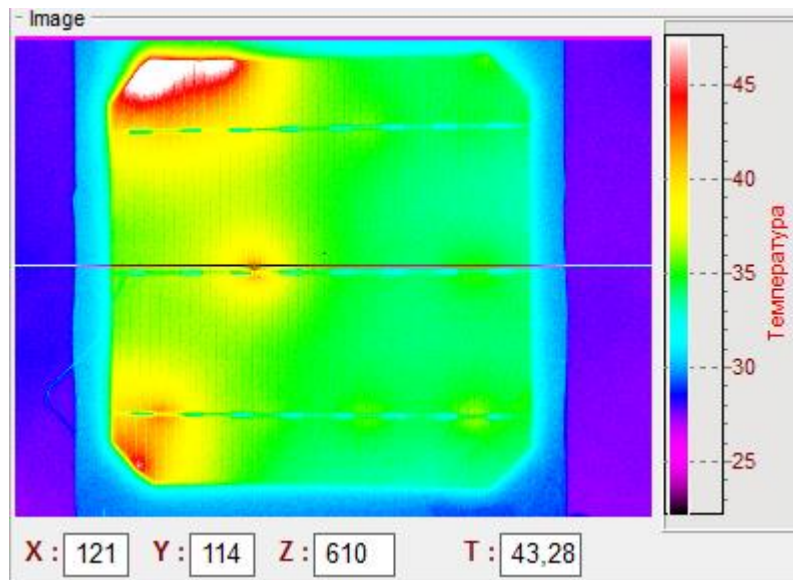


Рис. 2.39 – Термографічне зображення СЕ при нагріванні темновим зворотним струмом (теплом Джоуля): межа білий/червоний відповідає +45 град. За Цельсієм; температура пікселя з координатами (121;114) дорівнює 43, 28 град

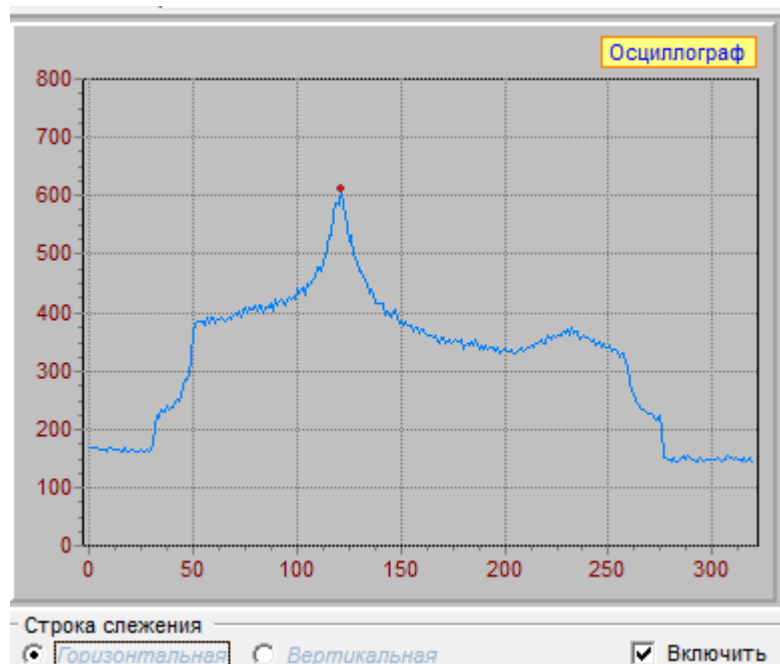


Рис. 2.40 - Горизонтальна осцилограма: максимум знаходиться в точці з координатами (121; 114)



Рис. 2.41 - Вертикальна осцилограма

Осцилограми ми розглядаємо як альтернативний метод до контурної фільтрації термографічних зображень. За набором осцилограм можливе також виділення границь об'єкту дослідження. Проте, ми вважаємо для задач термографічного контролю сонячних елементів краще відповідає метод контурної фільтрації термограм.

Висновки до розділу 2.

Результати виконання завдання були отримані такі результати:

- виконано огляд досліджень методів і засобів візуалізації дефектних зон сонячних елементів на основі застосування інфрачервоної термографії;
- доведено зв'язок між процесами деградації у фотоелектричних сонячних батареях із наявністю дефектних зон в сонячних елементах; критерієм деградації визначено абсолютне зменшення коефіцієнту корисної дії на два відсотки;
- проаналізовано основні алгоритми цифрової фільтрації зображень з метою зменшення похибок вимірювання геометричних розмірів дефектних зон сонячних елементів;
- виконано розрахунок теплової потужності дефектної зони окремого сонячного елемента у складі батареї за його термограмою.

Отримані результати можуть бути корисними в навчальному процесі кафедри, а також при розробці методів і засобів контролю дефектів фотоелектричних сонячних батарей в умовах їх виробництва та експлуатації.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «ВИМИРЮВАННЯ РОЗМІРІВ ДЕФЕКТНИХ ЗОН СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАСТОСУВАННЯМ КОНТУРНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ»

5.1 Опис ідеї проекту

Виявлення дефектів сонячних елементів різної природи, їх візуалізація різними методами та засобами, вимірювання їх параметрів та оцінювання їх впливу на експлуатаційні параметри і характеристики як окремого сонячного елемента, так і батареї в цілому, складають проблематику наукових досліджень.

Вимірювання геометричних розмірів дефектних зон відбувається за результатами їх візуалізації методом інфрачервоної термографії (ІЧТ) та обробки отриманих зображень. Нами досліджується можливість застосування при цьому різних алгоритмів фільтрації, зокрема, контурного фільтру. Контурна фільтрація (КФ) дозволяє зменшити похибку вимірювання розмірів дефектних зон. На основі даного вимірювання можливий більш точний розрахунок параметрів дефектної зони, зокрема, її теплової потужності. Це надасть об'єктивну інформацію про ступінь дефектності сонячного елемента та здатність фотоелектрична сонячна батареї (ФЕСБ) до подальшої експлуатації.

Часто зображення містять не тільки корисну інформацію, а й різні перешкоди. Якщо такі перешкоди носять випадковий характер, то вони називаються шумами. Зашумлене зображення називається стохастичним. Розглянемо моделі адитивної, імпульсного і мультиплікативного шуму.

Модель адитивного шуму використовується, коли сигнал на виході системи і на проміжному етапі його перетворення розглядається як сума корисного сигналу і деякого випадкового сигналу. Так описують дію зернистості фотоплівки або флуктуаційний шум в радіосистеми.

Якщо дія шуму позначається не на всій протяжності сигналу, а тільки в випадково розташованих точках, де значення сигналу замінюється випадковою величиною, такий шум називається імпульсним. Такий шум зустрічається в системах передачі зображень по радіоканалах з використанням нелінійних видів модуляції (наприклад, частотна), в цифрових системах передачі та зберігання зображення.

У мультиплікативній моделі шуму корисний сигнал множитья на випадковий сигнал. До такої моделі відноситься шум фотоелектронних помножувачів, дифузійний шум в голографічних зображувальних системах тощо.

Таким чином, вимірювання розмірів дефектних зон сонячних елементів застосуванням контурної фільтрації, може мати економічні перспективи у випадку подальших досліджень.

Тому нами була розроблена програма, для вимірювання розмірів дефектних зон сонячних елементів застосуванням контурної фільтрації.

В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту який має на меті визначити чи наш продукт має шанси вийти на ринок і конкурувати з продуктами які вже зайняли на ньому своє місце

У таблиці 5.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1.

Опис ідеї стартап-проекту.

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка програми для вимірювання розмірів дефектних зон сонячних елементів застосуванням контурної фільтрації.	Зменшення похибок вимірювання геометричних розмірів дефектних зон сонячних елементів.	Впевненість у якості сонячного елементу.
	Уточнений розрахунок теплової потужності дефектної зони сонячного елементу.	Забезпечення себе від можливого фінансового прорахунку, і довговічності безпечного та якісного забезпечення сонячної енергії.
	Аналіз алгоритмів контурної фільтрації при вимірюванні геометричних розмірів зображень теплових полів.	
	Визначення відповідності заявлених характеристик від виробника з дійсними характеристиками сонячних елементів, при їх експорті та імпорті.	Можливість контролю сонячних елементів.

Основними конкурентами на ринку є програма фільтрації Picasa (США 2014), Domber (США, 2015), Bool (Індія, 2015).

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту.

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент1	Конкурент2	Конкурент3			
1.	Вартість приладу, \$	80	200	150	130	-	-	+
2.	Швидкість встановлення, хв	5	12	24	15	+	-	-
3.	Вартість обслуговування	80	200	400	450	-	-	
5.	Затрати на виробництво	Високі	Середні	Низькі	Середні	-	-	-
6.	Відносини з органами державної влади	Добрі	Добрі	Добрі	Добрі	-	+	-
7.	Торгова марка	Немає	Є	Є	Є	+	-	-

Отже, пропонується програма, оновна функція якої є розгляд зображень дефектних зон фотоелектричних сонячних батарей на основі кристалічного кремнію. Експериментально доведено, що застосування алгоритмів контурної фільтрації дозволяє більш точно визначати межі зони дефекту та вимірювати його геометричні розміри. Завдання зробити прилад доступним для широкого використання у експрес-діагностиці, зменшити його вартість та тривалість вимірювань стали завданням для цього етапу роботи.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

- проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.2).

Для формування конкурентоспроможності запропонованого товару на ринку визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології (методу визначення), за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3.

Технологічна здійсненність ідеї проекту.

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Розробка програми для детального розгляду зображень дефектних зон сонячних елементів.	Створення програми для знаходження та визначення дефектів на основі фотоконтурного зображення	Метод визначення на якому побудований прилад відкритий	Метод доступний
2	Розробка приладу для ідентифікації та визначення концентрації здатних до люмінесценції хімічних сполук	Створення приладу для ідентифікації та визначення концентрації здатних до люмінесценції хімічних сполук на основі термостимульованої люмінесценції	Метод визначення на якому побудований прилад відкритий	Метод малодоступний
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Розробка програми для детального розгляду зображень дефектних зон сонячних елементів	Створення програми для знаходження та визначення дефектів на основі фотоконтурного зображення	Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Розробка програми для детального розгляду зображень дефектних зон сонячних елементів	Створення програми для знаходження та визначення дефектів на основі фотоконтурного зображення	Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Розробка програми для детального розгляду зображень дефектних зон сонячних елементів

Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок що наш проект можна реалізувати за допомогою більшості методів, які доступні на даний момент, але серед доступних нам ми обираємо метод фотоконтурного зображення та будемо використовувати його для реалізації нашої ідеї.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Це дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 5.4).

Таблиця 5.4.

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту.

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	2872000 (100x28720)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Патентування продукту, середня конкуренція, високий показник якості обслуговування.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ EN 94326-2-1:219 ДСТУ EN 95060-2-033:2017 ДСТУ EN 95060-2-219:2017
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	73%

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок що ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.5).

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту.

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних цільових груп потенційних клієнтів	Вимоги до споживачів до товару
Точна інформація розрахунку рентабельності сонячних елементів	Підприємства, які виготовляють продукцію і використовують дешеві деталі для створення готового сонячного пристрою. Підприємства, які реалізують продукцію на території держави, або купують її для експорту. Кінцевий користувач(покупець)	Технічні стандарти які встановлюються на підприємствах. Після купівлі нашого програмного забезпечення вимірювань з інтегрованим програмним забезпеченням клієнт може користуватися нею при розрахунках на протязі вказаного періоду після чого йому доведеться продовжити договір з продавцем.	<p>- до продукції Невеликі розміри приладу. Можливість проведення досліджень в польових умовах. Невелика чутливість приладу до зовнішніх чинників. Можливість виведення результатів на комп'ютер. Безперебійна робота приладу. Зрозуміле управління приладом. Великий термін експлуатації.</p> <p>- до компанії-постачальника Відповідність приладу заданим характеристикам. Можливість технічної підтримки при виникненні проблем. Ввідний інструктаж по роботі з програмним забезпеченням.</p>

При купівлі даного продукту клієнт може зіткнутися з певними проблемами. Для їх попередження і швидкого виправлення необхідний постійний зв'язок користувача з виробником, наявність висококваліфікованих працівників для роботи з усуненням цих проблем. (таблиця 5.6).

Таблиця 5.6.

Фактори загроз.

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Можливість появи на ринку іноземних аналогів з кращими характеристиками і нижчою ціною.	Вивчення продукції конкурентів та вдосконалення своєї, для задоволення всіх потреб користувачів.
2.	Інфляція	Падіння курсу гривні, рубля, за рахунок чого можуть зменшитися продажі	Реалізація продукту в більш стабільній (іноземній) валюті та моніторинг економічної ситуації в країні
3.	Наявність локального конфлікту на сході	Може вплинути на коло потенційних покупців.	Пошук нових клієнтів на міжнародному ринку
4.	Постачання	Проблема з фірмами постачальниками	Зміна політики розповсюдження продукту
5.	Технічний	Збої в роботі програмного забезпечення	Спрощення алгоритмів налаштування або впровадження постійної підтримки кваліфікованих техніків

Наявність певних загроз реалізації продукції дозволить вдосконалювати програменне забезпечення та завжди бути в курсі всіх наукових новинок та економічної ситуації в країні, що забезпечить вміння розвиватися при складних умовах та можливість конкурувати з головними гравцями ринку і підняття свого рівня. Окрім певних загроз, ми маємо ряд переваг та можливостей. (таблиця 5.7).

Таблиця 5.7.

Фактори можливостей.

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Науково-технічні	Зміниться технологія виготовлення товару.	Впровадить технологію і змінить вартість товару.
2.	Попит	Збільшення попиту на товар на ринку.	Збільшення продажів, а відповідно і прибутків компанії
3.	Економічні	Політика протекціонізму; підтримка інноваційного виробництва.	Підвищення/пониження ціни на продукт; зменшення податкового тиску
4.	Політико правові	Може вплинути на купівлю/продаж товару.	Зміна напрямків імпорту

Таблиця 5.8.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку.

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції	Олігополія	Можливість домовленості з іншими олігополістами для отримання взаємної вигоди
2. Рівень конкурентної боротьби	Національний	Вдосконалення продукту і пошук можливості виходу на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою	Міжгалузева	Розширення ринку за рахунок збільшення попиту
4. Конкуренція за видом товарів	Товарно-видова	Вдосконалення та реклама для показу переваг
5. За характером конкурентних переваг	Нецінова	Вдосконалення свого продукту і при цьому невелике зменшення цін відносно конкурентів
6. За інтенсивністю	Не марочна	Розробка бренду і його активна реклама

Після аналізу конкуренції (таблиця 5.8) проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.

Таблиця 5.9.

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером.

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	На даний момент на ринку присутні 3 прямі конкуренти, які займаються виготовленням даного обладнання	Патенти на продукти. Законодавчі обмеження. Гнучкі ціни.	Постачальниками є інтернет магазини який займаються розповсюдженням програмного забезпечення. Диференціація витрат. Концентрація постачальників. Значення розміру поставок	Основними клієнтами є підприємства легкої промисловості. Розмір закупівель. Система інформації. Прибутки. Контроль якості.	Компанія володіє доволі сильною пропозицією, максимальна схожі доступні аналоги практично відсутні
Висновки:	Проводити аналіз пропозицій, працювати над зниженням собівартості	Потенційних конкурентів немає	Так як концентрація постачальників доволі висока вони не диктують умови роботи на ринку.	Для клієнтів головне ціна, вони хочуть платити менше.	Підтримувати хороші позиції на ринку та конкурентну перевагу, розроблювали нові види.

Провівши аналіз факторів робимо обґрунтування конкурентоспроможності. Точна оцінка конкурентоспроможності можлива лише після впровадження приладу, тому робимо лише попередню оцінку конкурентоспроможності.

Таблиця 5.10.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності.

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Ціна	Підтримка зворотного зв'язку з клієнтами, усунення виниклих проблем при роботі, вдосконалення приладу, а відповідно збільшення попиту на продукт, що в результаті дозволить знизити ціну.
2	Велика кількість постачальників	Наявність приладу та своєчасна доставка продукту клієнту.
3	Висока якість	Висока якість і точність приладу, яка дозволяє клієнту отримувати максимально точний результат вимірювань.
4	Технічна підтримка	Наявність досвідчених спеціалістів, які зможуть швидко вирішити будь яку проблему в роботі приладу.
5.	Наявність патентів	Наявність патенту на приладу, це дає споживачу упевненість в тому що він купує сертифікований продукт

Таблиця 5.11.

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін приладу.

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашим приладом							
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	
1	Наявність патентів	16	+							
2	Велика кількість постачальників	15				+				
3	Висока якість	17	+							
4	Технічна підтримка	19	+							
5.	Ціна	14								+

З таблиць 5.10 та 5.11 бачимо, що фактори конкурентоспроможності суттєві та мають великий позитивний внесок при впровадженні нового програмного забезпечення для розрахунку концентрації пилю. Основною перевагою та головним досягненням є висока якість продукту та технічна підтримка на протязі всього терміну його використання споживачем.

Таблиця 5.12.

SWOT- аналіз стартап-проекту.

<p>Сильні сторони: За наявності патентів споживач впевнений в якості отриманого продукту. За рахунок хорошої підтримки ми закріплюємо свої позиції на ринку. Завдяки високій якості продукту приваблюються нові клієнти.</p>	<p>Слабкі сторони: Так як на ринку багато постачальників, у клієнтів багатий вибір продукту, компанії необхідно проводити рекламу свого продукту і збільшувати кількість його постачальників. За рахунок високої ціни клієнти обирають більш дешевий продукт, що призводить до втрати потенційного заробітку.</p>
<p>Можливості: 1. Зміниться технологія виготовлення товару. 2. Збільшення попиту на товар на ринку. 3. Політика протекціонізму; підтримка інноваційного виробництва. 4. Може вплинути на купівлю/продаж товару. 5. Підвищення зацікавленості людей впливу різних речовин і продуктів на навколишнє середовище.</p>	<p>Загрози: 1. Можливість появи на ринку іноземних аналогів з кращими характеристиками і нижчою ціною. 2. Зміна курсу гривні, за рахунок чого можуть зменшитися продажі 3. Може вплинути на коло потенційних покупців. 4. Проблема з фірмами постачальниками. 5. Збої в роботі приладу.</p>

На основі SWOT-аналізу розробляємо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів.

Таблиця 5.13.

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту.

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	1 рік
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	1 рік
3	Стратегія виходу з ринку	Низька	

З зазначених альтернатив обираємо стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 5.14.

Вибір цільових груп потенційних споживачів.

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Промислові компанії	Зазначатиметься готовністю підприємств піти на додаткові витрати пов'язані з вдосконаленням приладу та розширення його функціональних можливостей.	Залежатиме від рівня та від темпу розвитку економіки взагалі і галузі споживача зокрема	Середня	Середні бар'єри входу на ринок
2	Державні установи контролю якості продукції.			Середня	Середні бар'єри входу на ринок
3	Інститути, вчені яких проводять дослідження в даній області			Середня	Середні бар'єри входу на ринок

За результатами аналізу потенційних груп споживачів ми обрали цільові групи, для яких будемо пропонувати свій прилад та визначили стратегію охоплення ринку: стратегію диференційованого маркетингу, тому що працюємо із конкретним сегментом, розробляючи для нього програму ринкового впливу.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувавши базову стратегію розвитку.

Таблиця 5.15.

Визначення базової стратегії розвитку.

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Диференційований маркетинг	Якісний продукт, до якого прихильні споживачі, постійний зворотній зв'язок з клієнтами.	Стратегія диференціації

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16).

Таблиця 5.16.

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки.

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Передбачається розвиток ринку	Ні, не буде. Буде утворено унікальну продукцію	Зайняття конкурентної ніші

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект

Таблиця 5.17.

Визначення стратегії позиціонування.

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію власного проекту (три ключових)
-------	-------------------------------------	---------------------------	--	---

1	Вдосконалення продукту враховуючи побажання споживачів	Стратегія диференціації	Висока якість продукту. Формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.	Якість. Ціна. Зворотній зв'язок із виробником. Технічна підтримка.
---	--	-------------------------	--	---

Результатом даного підрозділу є система рішень ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія.

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 5.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.18.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару.

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Потреба в контролі якості та врахування точного прибутку від їх використання.	Отримання результатів про склад продукції, який важко або неможливо визначити іншими пристроями або методами.	Постійна технічна підтримка. Безперебійна робота приладу. Систематизація та спрощення обробки результатів досліджень.

Таблиця 5.19.

Опис трьох рівнів моделі товару.

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Створення програми для вимірювання розмірів дефектних зон сонячних елементів застосуванням контурної фільтрації. Можна виділити наступні вигоди використання: Максимально точне виявлення дефектів сонячних елементів; Можливість розповсюдження сонячних приладів на міжнародні ринки, завдяки якості.
II. Товар із підкріпленням	До придбання товару, користувач може зайти на сайт, скачати пробну версію програмного забезпечення, яка діє протягом 30 днів і якщо програма його задовольняє він може купити версію, і продовжити роботу з програмою на один календарний рік. Після придбання товару один раз на рік клієнт буде отримувати пропозицію оновити версію програми через мережу з виправленням попередніх помилок.
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Від копіювання товар буде захищено шляхом патентування коду (отримання сертифікату про інтелектуальну власність) та надання кожній проданій копію індивідуального ліцензійного коду який необхідно вводити при запуску програми.	

Далі визначаємо цінові межі, якими необхідно користуватися при визначенні ціни продукту, щоб він користувався попитом на ринку. При аналізі цінових меж та встановленні ціни необхідно враховувати ціни на прилад, які пропонують конкуренти та доходи потенційних клієнтів. (таблиця 5.20).

Таблиця 5.20.

Визначення меж встановлення ціни.

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	22 000 – 100 000 грн.	35 100 – 117 000 грн.	300 000 – 400 000 грн.	17 990-20 490 грн.

Таблиця 5.21.

Формування системи збуту.

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Покупка товару один раз	Можливість купити програму через інтернет	Канал збуту нульового рівня	Мережа інтернет

Таблиця 5.22.

Концепція маркетингових комунікацій.

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Необхідність контролю якості сонячних елементів. Можливість виведення продукції на міжнародні ринки, через чистоту і прозорість їх складу.	Мережа інтернет, виставки, семінари, друкована продукція.	Спеціалізовані виставки	Проінформувати клієнта про те, що за допомогою приладу стає можливим максимально точно визначення якості сонячних приладів про які замовчують виробники.	Купуй тільки якісне, не витрачай свої гроші на низькопробні товари. Не хочеш потрапити в боргову яму – тобі до нас. Втомився вірити брехні від посередніх виробників – докопайся до істини.

Результатом даного підпункту є ринкова програма яка включає концепцію збуту, просування, аналіз ціноутворення, вона залежить від цінностей та потреб потенційних клієнтів, стану ринку.

5.6 Висновки

Провівши детальний аналіз стартап проекту, можна зробити висновок, що даний продукт буде цікавий потенційним клієнтам і має хорошу можливість ринкової комерціалізації. У зв'язку з хорошою динамікою ринку на розроблений продукт буде хороший попит у споживачів, і з точки зору рентабельності проект обіцяє бути дуже прибутковим. З огляду на потенційні групи клієнтів перспективи впровадження проекту є дуже високими. Але за рахунок того, що на ринку вже є присутні аналоги продукту який розробляється бар'єр входження на ринок є досить високим. Тому для

успішного виходу на нього треба надати нашому продукту властивостей які будуть виділяти його серед конкурентів. На даний момент продукт є конкурентоспроможним але для підвищення довіри споживачів і формування своєї бази клієнтів необхідно:

Формування внутрішньовиробничих карт звітності з якості продукції отриманих за допомогою розробленого засобу вимірювань з подальшою реєстрацією результатів вимірювань в ДП"Укрметртестстандарт".

Проведення публічної презентації результатів проекту серед цільової групи користувачів, та широкого кола науковців на профільних заходах.

Провести дієву рекламну компанію за допомогою електронних та друкованих профільних для галузі застосування засобу вимірювань видань, для зацікавлення продуктом потенційних користувачів.

Підтримувати зворотній зв'язок з клієнтами, удосконалювати вимірювальний засіб для задоволення рекламацій клієнтів що виникли в процесі технічного обслуговування засобу вимірювань.

Як альтернативний варіант впровадження нашого стартап проекту для ринкової реалізації проекту доцільно обрати початок продаж нашого продукту в мережі інтернет і для одного сегменту ринку, а тільки після закріплення на ринку вже починати шукати клієнтів в інших сегментах і пропонувати їм наш продукт.

ВИСНОВКИ

Відповідно до мети роботи: дослідити можливості зменшення похибки вимірювання розмірів дефектних зон на зображеннях фотоелектричних сонячних елементів, отриманих методом інфрачервоної термографії, застосуванням контурної фільтрації, а також до завдання були опрацьовані такі задачі:

- проаналізовано основні характеристики зображення;
- виконано аналіз систем обробки зображень;
- проаналізовано основні алгоритми виділення контурів зображень;
- розглянуто модель побудови зображення телевізійною або інфрачервоною камерою;
- розглянуто модель лінійного зсуву зображення, яке формує телевізійна вимірювальна система;
- на експериментальному матеріалі доведено безпосередній зв'язок між неоднорідністю теплового поля сонячного елемента та його коефіцієнтом корисної дії;
- на базі діючого стенду термографії фотоелектричних сонячних елементів і батарей досліджено метод візуалізації дефектних (або «гарячих») зон при нагріванні зразків темновим зворотним струмом;
- розраховано теплову потужність дефектної зони сонячної батареї із застосуванням контурної фільтрації;
- вдосконалено алгоритм контурної фільтрації термограм методом накладання кількох контурів, отриманих при різних кутах градієнту;
- проведено аналіз похибок вимірювання геометричних розмірів зображень на прикладі електролюмінесцентних дефектів, які були отримані телевізійною камерою;
- опрацьовано термографічні зображення дефектних зон сонячних елементів і батарей із застосуванням контурної фільтрації.

Застосування контурної фільтрації дозволило зменшити похибку вимірювання геометричних розмірів дефектних зон на 2% та похибку розрахунку теплової потужності дефекту на 3%.

Стабілізація струму дозволила вдосконалити засіб дослідження – лабораторний стенд з термографії сонячних елементів і батарей – за рахунок створення умов стаціонарного теплообміну об'єкту нагрівання із навколишнім середовищем. Відхилення потужності нагрівання зворотним темновим струмом від заданого значення не перевищила 2%.

Результати досліджень можуть бути використані при виробництві ФЕСБ, а також при їх вихідному контролі та в режимі експлуатації.

Практична цінність даних досліджень полягає у використанні вдосконаленого методу та засобу отримання термограм в лабораторному практикумі для навчання студентів зі спеціальності 152 – «Метрологія та інформаціо-вимірювальна техніка».

Апробація результатів дослідження відбулася на конференціях:

- 14-й Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених у приладобудуванні. – 4-5 грудня 2018 р. – м. Київ;

- 34-й Міжнародній науковій інтернет-конференції "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення". – 11 грудня 2018 р. – м. Тернопіль.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> [Электронный ресурс]
2. Kosjachenko A. (ed.). Solar Cells – Silicon Wafer-Based Technologies. [Текст] /А. Kosjachenko A. – :InTech. – 2011. – 364 p.
3. Breitenstein O. Lock-in Thermography – Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials. [Текст] /О. Breitenstein, W. Warta, M. Langenkamp. – Berlin: Springer. – 2010. – 256 p.
4. Breitenstein O. Nondestructive local analysis of current-voltage characteristics of solar cells by lock-in thermography. [Текст] /О. Breitenstein //Solar Energy Materials & Solar Cells. №95. – 2011. – №95. – P. 2933 – 2936.
5. Breitenstein O. An empirical method for imaging the short circuit current density in silicon solar cells based on dark lock-in thermography. [Текст] /О. Breitenstein, F. Fertig, J. Bauer // Solar energy materials and solar cells.– 2015. – № 143. – P. 406 – 410.
6. Simon M. Detection and analysis of hot-spot formation in solar cells. [Текст] /M. Simon, E.L. Meyer // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2010. – № 94. – P. 106–113.
7. Жигунов Д.М. Люминесценция солнечных элементов с гетеропереходом a-Si:H/c-Si. [Текст] /Д.М. Жигунов, А.С. Ильин, П.А. Форш и др. //Письма в ЖЭТФ, 2017, т. 43, вып.10. – 2017 – С. 95 – 101. – DOI: 10.21883/PJTF.2017.10.44626.16626
8. Giesecke J. Harmonically modulated luminescence: Bridging gaps in carrier lifetime metrology across the PV processing chain. [Текст] /J. Giesecke, M.C. Schubert, F. Schindler, W. Warta //IEEE Journal of Photovoltaics.– 2015. – №1. – P. 313 – 319.
9. Haunschild J. Fast series resistance imaging for silicon solar cells using electroluminescence. [Текст] /J. Haunschild, M. Glatthaar, M. Kasemann and others // Phys. Stat. Sol. RRL. – 2009. – № 3. – P. 227 – 229.

10. Breitenstein O. Quantitative evaluation of electroluminescence images of solar cells. [Текст] /O. Breitenstein, A. Khanna, Y. Augarten and others //Phys. Stat. Sol. RRL. – 2010. – № 4. – P. 7 – 9.
11. Wang Y. Research to the typical defects of crystalline silicon photovoltaic cells based on EL images. [Текст] /Y. Wang, Z. Haipeng, S. Dengyan. International Journal of Energy Sciens (IJES), 2013, Vol. 3 – Is 3. – P. 200 – 204.
12. Вербицкий В.П. Электролюминесцентные исследования эффективности солнечных элементов. [Текст] /В.П. Вербицкий, И.Е.Панайотти, С.Е. Никитин, А.В. Бобыль и др. //Письма в ЖЭТФ, 2017, т. 43, вып.17. – 2017. – С.3 – 11. – DOI: 10.21883/PJTF.2017.17.44940.16479
13. Попов В.М. Локальные свойства электрически активных дефектов в солнечных батареях на основе кремния. [Текст] /В.М. Попов, А.С. Клименко, А.П. Поканевич, Ю.М. Шустов, И.И. Гаврилюк, А.И. Панин. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, №4. – 2010. – С.43– 48.
14. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений [Текст] /Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. :Техносфера. – 2005. – 1072 с.
15. Грузман И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах[Текст] /И.С. Грузман и др.–Новосибирск. :Наука. –2000– 168с.
16. Фурман Я.А. Введение в контурный анализ [Текст] /Я.А. Фурман и др. – М. :Физматлит. – 2003. – 590 с.
17. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection / J. Canny //IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. Volume PAMI-8, №6, November 1986. – P. 679 – 698.
18. Худов В.Г. ОЦІНКА ЯКОСТІ ЕВОЛЮЦІЙНОГО МЕТОДУ СЕГМЕНТУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ, ЩО ОТРИМАНО З БОРТОВИХ СИСТЕМ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ [Текст]/В.Г. Худов, О.М. Маковейчук, І.А. Хижняк //Системи управління, навігації та зв'язку, 2017, випуск 4(44). – С. 133 – 137.
19. Андреев А.Л. Аппаратные и программные средства оптико-электронных приборов с телевизионными датчиками на ФПЗС: методические

указання / А.Л. Андреев, С.Н. Ярышев, А.Р. Стрелков. – СПб.: издательство ИТМО. – 1995. – 49 с.

20. Lanz T. Electrothermal Finite-Element Modelling for Defect Characterization in Thin-Film Silicon Solar Modules. [Текст] /Lanz T., Bonmarin M., Stuckelberger M., Schlumpf C., Ballif C., Ruhstaller B. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol.19, №5, Sept.-Oct. – 2013. – P. 1077 – 1084.

21. Божко К.М. Інфрачервона термографія сонячних елементів, нагрітих темновим струмом [Текст] /К.М. Божко, В.І. Дунаєвський, В.Й. Котовський, В.П. Маслов, В.А. Порєв //Вісник НТУУ «КПІ». Сері: Приладобудування. – 2013. – Вип. 46. – С. 56 – 63.

22. Порєв В.А. Термографический контроль солнечных элементов и батарей в режиме стабилизации нагрева темновым током [Текст] /В.А. Порєв, В.И. Дунаевский, К.М. Божко //Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Москва. – 2014. –№2. – С. 57 – 61.

23. Божко К.М. Термографічний метод дослідження сонячних елементів при їх нагріванні темновим струмом [Текст] /К.М. Божко, І.В. Морозова // Сучасна наука – інструмент динамічного розвитку економіки України: Всеукраїнська наукова конф. 20-21 травня 2013 р. (вип.. 21): тези доп. – Тернопіль. – 2013. – С. 88 – 89.

24. Божко К.М. Застосування еквівалентних схем в методах інфрачервоної термографії сонячних елементів [Текст] /К.М. Божко, І.В. Морозова, Н.А. Федченко // Економічна кібернетика – інженерія економіки (вип.. 22): Всеукраїнська наукова конф. 27-28 вересня 2013 р.: тези доп. – Тернопіль. – 2013. – С. 5 – 6.

25. Bozhko K. The role of the solar power industry in sustainable development of society. [Текст] /К. Bozhko. //Sustainable Development: Social and Economic Changes. Monograph. – Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. – 2016. – P. 36 – 42.

26. Глуховський В.Ю. Особливості створення систем оцінки геометричних параметрів методом тепловізійного контролю [Текст] /В.Ю. Глуховський, В.О. Троїцький //Методи та прилади контролю якості. – 2014. – №2 (33). – С.3 – 9.
27. Ibrahim A. Dark Current -Voltage Characteristics and Lock-in Thermography Techniques as Diagnostic Tools for Monocrystalline Silicon Solar Cells [Текст] /Ali Ibrahim //International Journal Of Renewable Energy Research, IJREP – 2011. – Vol.1, №3. – P.60 – 65.
28. Konovalov I.E. Local current-voltage curves measured thermally (LIVT): A new technique of characterizing PV cells [Текст] / Igor E. Konovalov, Otwin Breitenstein, Kornelius Iwig //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 1997. – № 48. – P.53 – 60.
29. Госсорг Ж. Инфракрасная термография [Текст] /Ж. Госсорг // М.: Мир. – 1988. – 416 с.
30. Порев В.А., Маркін М.О. Мультиспектральні тепловізійні прилади контролю високотемпературних технологій [Текст] /В.А. Порев, О.М. Маркін //Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006. – №4/2 (22). – С. 34 – 39.
31. Мисюк Ю.П. Тепловізори як сучасні інтегровані технічні засоби охорони державного кордону [Текст] /Ю.П. Мисюк //Світлотехніка та електроенергетика. №3. – 2011. – №3. – С. 43 – 49.
32. Колючкин В.Я. Тепловизионные приборы и системы: учеб. пособие [Текст] /В.Я. Колючкин, Г.М. Мосягин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2002. – 60 с.
33. Боженко В.І, Шклярський В.І. Тепловізійні системи як засіб дослідження теплових об'єктів [Текст] /В.І Боженко, В.І. Шклярський. – Lviv Polytechnic National University Institutional Repository. – 2008. – P. 45 – 55.
34. Аль-Мзирави А. М. Анализ возможности применения в медицинской диагностике матричных тепловизоров, работающих в спектральных диапазонах 3-5 и 8-12 мкм [Текст] /А. М. Аль-Мзирави,

Колобродов В. Г., Котовский В. И. //Вісник НТУУ “КПІ”. Серія: Приладобудування. – 2013. – Вип. 46. – С. 134 – 140.

35. Vozhko K. Thermographic modeling of pollution of reservoirs with solutions NaCl [Текст] /K. Vozhko, V. Maslov, V. Porev and others. //American Journal of Environmental Protection.– 2014. – Vol. 3, №5. – P. 263 – 266.

36. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб.пособие для приборостроительных вузов [Текст] /М.М. Мирошников. – Л.: Машиностроение, 1983.— 696 с.

37. Скопа, О. О. Вибір методики та розрахунків коефіцієнтів помилкового пропуску та помилкової відмови доступу у системах біометричної ідентифікації [Текст] / О. О. Скопа, О. О. Фразе-Фразенко // Бионика интеллекта. — 2014. — № 1(82). — С. 80-89.

38. Скопа, О. Анізотропна фільтрація зображень у системах аутентифікації [Текст] / О. Скопа, О. Фразе-Фразенко // Захист інформації і безпека інформаційних систем: II міжнар. наук.-техн. конф., Львів, 30 травня – 01 червня 2013 р. : матер. конф. — Львів, НУ«Львівська політехніка», 2013. — С. 156-158.

39. Фразе-Фразенко, О. О. Багатоагентний метод виділення інформативних ознак зображень у системах доступу [Текст] / О. О. Фразе-Фразенко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. — 2013. — № 15(204). — С. 210-218.

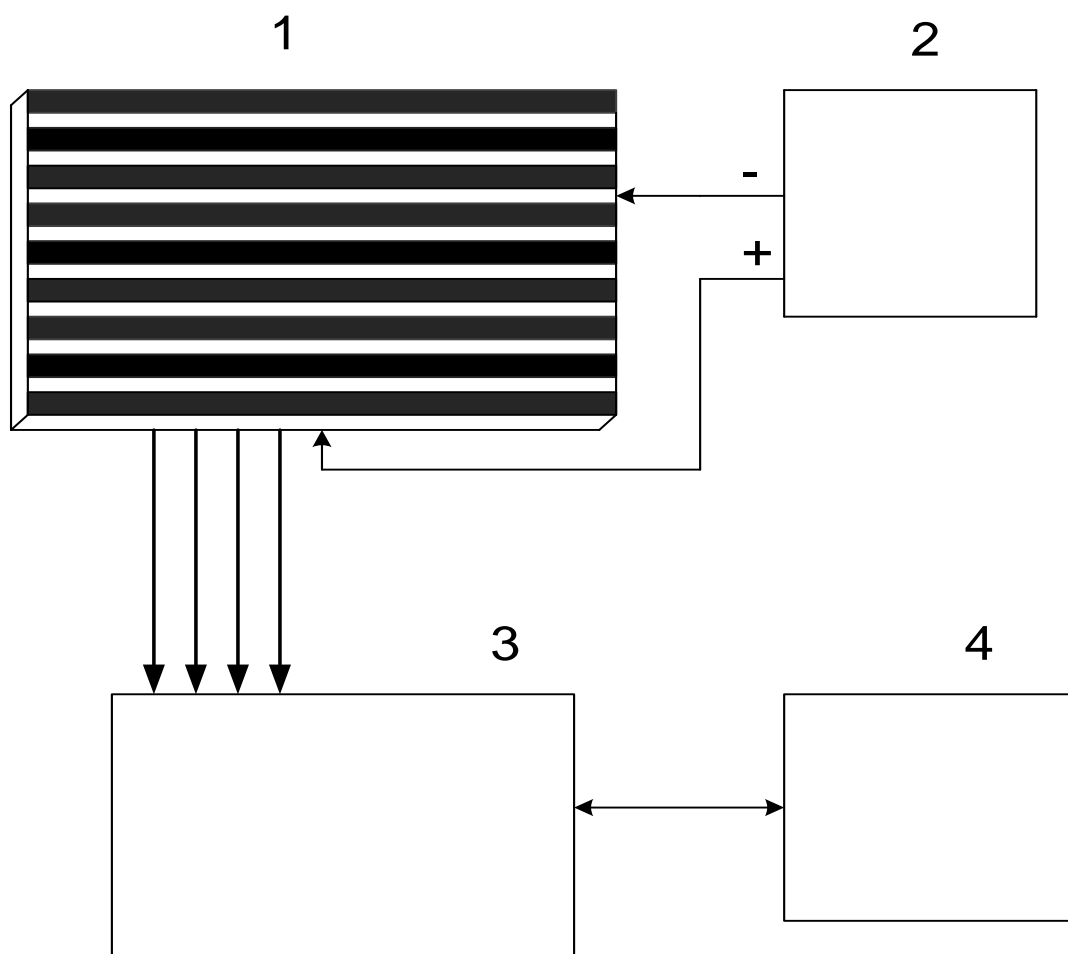
40. Фразе-Фразенко, О. О. Использование биометрических термопоказателей для идентификации в системах доступа [Текст] / О. О. Фразе-Фразенко //Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2013. — № 1/1(9). — С. 33-35.

41. Божко К.М. Графічний розрахунок теплової потужності дефекту типу “hot spot” сонячної батареї [Текст] /К.М. Божко, А.Д. Желілова //Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (вип. 13): Всеукраїнська наукова конф. 20 – 21 травня 2015 р.: тези доп. – Тернопіль. – 2014. – С.65 – 67.

42. Kreith F. Basic Heat Transfer. [Текст] /F. Kreith, W.Z. Black. – NewYork. : Harper and Row. – 1980. – 512 p.
43. Порев В.А. Исследование люминесцирующих дефектов солнечных панелей [Текст] /В.А. Порев, Р.И. Пахалюк, К.М. Божко //Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. –2014. –№1. – С. 11-14.
44. Пахалюк Р.І. Візуалізація дефектів кремнієвих фотоелектричних сонячних батарей [Текст] /Р.І. Пахалюк, К.М.Божко //Вісник НТУ “ХП”. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси – 2014. – Вип. 40. – С. 3 – 7.
45. Порев В.А. Застосування сплайн-функцій для збільшення швидкості контролю динамічних параметрів зонної плавки [Текст] /В.А. Порев, Ю.А. Агінський, К.М. Божко //Вісник НТУУ «КП». Секція: Приладобудування. – 2012. – Вип. 44. – С. 58 – 63.
46. Порев В.А. Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів [Текст] /В.А.Порев, Г.В.Порев //Наукові вісті НТУУ “КП”. – 2001. – №1. – С.56 – 61.
47. Jiang L.J. A perspective on medical infrared imaging // Journal of medical engineering and technology. 2005 V. 29, N 6. P. 257–267.
48. Lahiri V.V. Medical applications of infrared thermography: A review // Infrared Physics and Technology. 2012. V. 55, N 4. P. 221–235.
49. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. 1979. V. 9, N 1. P. 62–66.
50. Шуляк В.С. Теплове поле сонячного елемента при протіканні зворотного темного струму та його вольт-амперна характеристика /В.С. Шуляк, К.М. Божко //Збірник праць 14-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених у приладобудуванні. – 4-5 грудня 2018 р. – м. Київ. – С. 214-217.
51. Шуляк В.С. Контурна фільтрація у термографії сонячних елементів /Шуляк В.С., Божко К.М. //Матеріали 34-ої Міжнародної наукової

інтернет-конференції "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення". – 11 грудня 2018 р. – м. Тернопіль. – 2с.

Додаток А. Структурна схема лабораторного стенду термографії
сонячних елементів



1 – сонячний елемент, 2 – лабораторний блок живлення, 3 – термограф,
4 – персональний комп'ютер

Додаток Б. Алгоритм обробки термографічного зображення
на основі методу Кенні

