

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ТЕПЛОВІЗІЙНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра за освітньою програмою
«Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Укладачі: В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензенти *Тимчик Г. С., д.т.н., проф., декан приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Маркін М.О., к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційно-
вимірювальних технологій КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Відповідальний *Васильковська І. О., к.т.н.*
редактор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 30.03.2023 р.)
за поданням Вченої ради приладобудівного факультету
(протокол № 2/23 від 27.03.2023 р.)*

Лабораторний практикум присвячено методам визначення основних параметрів і характеристик тепловізійних систем. У вигляді лабораторних робіт викладено методики проведення експериментальних досліджень для вимірювання об'єктивних та суб'єктивних показників якості тепловізорів, які використовуються в найрозповсюдженіших розрахункових моделях, наприклад, STANAG 4347. Значну увагу приділено ознайомленню з принципами формування тепловізійного сигналу, фізичними основами утворення тепловізійного зображення і особливостями його зорового сприйняття.

Для магістрів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», що навчаються за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології».

Реєстр. № НП 22/23-553. Обсяг 3,1 авт. арк.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідectво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

З М І С Т

Скорочення та умовні позначки	4
Загальні положення	5
Правила техніки безпеки при проведенні лабораторних робіт	6
Лабораторна робота №1. Дослідження телевізійного відеосигналу та відповідного йому зображення	7
Лабораторна робота №2. Дослідження закономірностей зорового сприйняття при спостереженнях з допомогою ОЕСС	16
Лабораторна робота №3. Вимірювання основних характеристик тепловізора на піровідіконі	25
Лабораторна робота №4. Вимірювання модуляційної передаточної функції мікроболометричної тепловізійної камери	34
Лабораторна робота №5. Термографія в медицині	41
Використані джерела	49
Додаток 1. Інструкція з електробезпеки при виконанні лабораторних робіт	50
Додаток 2. Короткий опис роботи з універсальним осцилографом С1-81...	51
Додаток 3. Короткий опис роботи з люксометром Ю 116	53
Додаток 4. Короткий опис роботи з фотометром ФП-4	54

Скорочення та умовні позначки

CTF	Contrast Transfer Function, функція передачі контрасту
MDTD	Minimum Detectable Temperature Difference, мінімальна виявлювальна різниця температур
MRTD	Minimum Resolvable Temperature Difference, мінімальна роздільна різниця температур
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference, еквівалентна шуму різниця температур
STF	Signal Transfer Function, функція передачі сигналу
TI	термографічний індекс
АЧТ	абсолютно чорне тіло
ВКП	відеоконтрольний пристрій
МПФ	модуляційна передавальна функція
ОЕСС	оптико-електронна система спостереження
ПЗЗ	прилад з зарядовим зв'язком
ПФ	передавальна функція
ε	коефіцієнт теплового випромінювання
ΔT	різниця температур
ν_x	просторова частота міри
$T_{об}$	температура тест-об'єкту
T_{ϕ}	температура фонового випромінювача
f_{max}	верхня частота телевізійного сигналу
f_k	частота кадрів
k	форматом кадру
L	яскравість зображення
N	кількість елементів в зображенні
p	кількість рядків в кадрі
t_{min}	тривалість найкоротшого фронту сигналу
K_z	контраст зображення

ВСТУП

Програмою курсу «Тепловізійні оптико-електронні прилади» для магістрів, які навчаються за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» «КПІ» ім. Ігоря Сікорського передбачено виконання комплексу лабораторних робіт.

В ході виконання лабораторних робіт студенти мають можливість ознайомитись з сучасними іконічними оптико-електронними системами видимого та інфрачервоного діапазонів, оволодіти методами експериментальних вимірювань їх основних характеристик та ознайомитись з відповідною нормативно-технічною документацією, отримати практичні навички, поглибити та закріпити теоретичні знання з різних розділів навчального курсу.

В першій частині лабораторних робіт розглядаються питання формування тепловізійних сигналів в оптико-електронних системах, особливості візуального сприйняття зображень з екрану тепловізійного типу. Останні роботи присвячено тепловізійним (з електронним і оптико-механічним скануванням) системам, що дозволяє закріпити знання, отримані студентами на лекціях та на практичних заняттях.

При підготовці до лабораторних робіт студенти мають вивчити рекомендовану літературу та знати відповіді на контрольні запитання.

На першому лабораторному занятті викладач знайомить студентів з правилами поведінки в лабораторії та проводить інструктаж з техніки безпеки.

Перед початком кожної лабораторної роботи студенти проходять перевірку знань і мають показати розуміння мети роботи, теоретичні знання за темою роботи, знання методів вимірювання, котрі використані в даній роботі.

Студенти, що не пройшли інструктаж та не розписалися в журналі з техніки безпеки, до виконання лабораторних робіт не допускаються.

ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

1. В ході виконання лабораторних робіт всі студенти проводять самостійну роботу тільки під наглядом викладача.
2. Всі студенти мають дотримуватись правил електробезпеки (Додаток 1).
3. Забороняється без дозволу викладача вмикати або вимикати обладнання, розподільний електричний щиток.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ПРОТОКОЛІВ

Протокол лабораторної роботи складається студентами індивідуально відповідно до діючих стандартів і оформлюється на аркушах паперу формату А4. Схеми та графіки виконуються на міліметровому папері того ж формату. Всі фізичні величини, що зустрічаються в роботі, повинні бути виражені в міжнародній системі одиниць СІ.

У кожному протоколі обов'язково повинні міститись такі дані:

1. Назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Схеми вимірювального стенду, прилади та обладнання, що використовуються.
4. Стислий опис методики проведення вимірювань.
5. Таблиці із заголовками, в яких подаються виміряні або обчислені величини та їх розмірності.
6. Описання методів розрахунку, формули та результати розрахунків.
7. Графіки із зазначенням на координатних осях розмірностей вимірюваних величин.
8. Висновки по проведеній роботі.

Лабораторна робота №1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО ВІДЕОСИГНАЛУ ТА ВІДПОВІДНОГО ЙОМУ ЗОБРАЖЕННЯ

Мета роботи: Вивчення структури повного телевізійного сигналу каналу яскравості. Ознайомлення з основними видами спотворень телевізійного зображення.

Завдання

1. Ознайомитись з структурою повного телевізійного сигналу каналу яскравості.
2. Замалювати осцилограму повного телевізійного сигналу в рядку на різних ділянках випробувальної таблиці та визначити основні часові параметри – тривалість повного рядка, тривалість гасних і синхронізуючих імпульсів.
3. Замалювати зображення, яке відповідає виділеному рядку.
4. Оцінити приблизне значення верхньої частоти телевізійного сигналу за тривалістю t_{min} найкоротшого фронту сигналу випробувальної таблиці ($f_{max}=0,5 t_{min}$).
5. Оцінити залежність глибини модуляції контрасту сигналу від діафрагми об'єктива передавальної камери.

Прилади та обладнання

1. Телевізійна камера зовнішнього спостереження з ПЗЗ-матрицею.
2. Відеоконтрольний пристрій (ВКП).
3. Телевізійний осцилограф з виділенням рядка С1-81.
4. Освітлювач з лампою розжарення.
5. Планшет з стандартною випробувальною таблицею для оцінки геометричних та градаційних параметрів каналу яскравості.

Основні положення

До складу будь-якої оптико-електронної системи спостереження (ОЕСС) телевізійного типу входять передавальна камера та відеоконтрольний пристрій (ВКП). Якість зображення на ВКП в основному залежить від характеристик передавальної камери, які, в свою чергу, можна визначити по формі телевізійного сигналу. У лабораторній роботі досліджується *форма повного телевізійного сигналу каналу яскравості*, який формує чорно-біле зображення.

Параметри повного телевізійного сигналу для чорно-білого телебачення визначені в ДСТУ 3837-99. До складу повного телевізійного сигналу входить безпосередньо відеосигнал, що відповідає зображенню, кадрові та рядкові синхроімпульси та гасні імпульси.

В основі функціонування будь-якої ОЕСС лежить процес поелементної і послідовної в часі передачі і відтворення інформації про розподіл яскравості в просторі предметів. Елементом зображення (пікселом) називають мінімальну деталь, яка може бути помітна на виході ОЕСС. В межах одного піксела зображення відтворюється лише середня яскравість. Зображення, яке утворене сукупністю всіх елементів, називається кадром. До кінця 20 століття розгортка (послідовна і поелементна передача/відтворення) зображення в переважній більшості ОЕСС здійснювалася за допомогою скануючого електронного променя. В процесі розгортки горизонтальні рядки утворювали телевізійний растр. При цьому передача і відтворення кожного піксела мають відбуватись синхронно і синфазно, що забезпечується рядковою і кадровою синхронізацією в передавальній камері і в блоці відображення. Зараз майже у всіх ОЕСС використовуються матричні приймачі випромінювання і матричні ВКП. Проте структура телевізійного сигналу в них залишилася незмінною для забезпечення сумісності з існуючою апаратурою.

До основних параметрів телевізійного сигналу, що впливають на вигляд зображення, відносяться формат кадру, кількість рядків в кадрі, тип розгортки, градаційні характеристики.

Форматом кадру k називається відношення ширини a зображення до його висоти b

$$k = \frac{a}{b} .$$

Формат кадру визначається виходячи з особливостей зорового сприйняття. Для перших телевізійних систем було вибрано значення $k = 4:3$, яке використовується зараз в більшості систем прикладного телебачення.

Оптимальне відношення висоти піксела до його довжини по горизонталі, при якому досягається візуальна рівність чіткості в вертикальному та горизонтальному напрямках, визначається коефіцієнтом Келла і складає від 0,42 до 0,65. Тому в деяких системах пізнішого часу використовується формат $k=16:9$ або $k=16:10$.

Кількість рядків p в кадрі при однакових горизонтальному і вертикальному розмірах піксела визначається кількістю елементів N в зображенні:

$$p = \sqrt{\frac{N}{k}} .$$

Наразі в ОЕСС використовуються два основні типи розгортки зображення - на 625 і 525 рядків. Спочатку для чорно-білого телебачення ці величини були вибрані як компроміс між якістю зображення виходячи з особливостей зорового сприйняття і технічними можливостями. Частота кадрів f_k була вибрана рівній частоті мережі живлення (50 Гц) для усунення мережевої завади. Крім того, при такій частоті зміни зображень спостерігач майже не помічає мерехтінь. Проте при цьому ширина спектру перевищує 13 МГц:

$$f_{\max} \approx 0,5 \cdot k \cdot p \cdot f_k = \frac{4 \cdot 625^2 \cdot 50}{4 \cdot 2} \approx 13 \text{ МГц} .$$

Для зменшення смуги частот без зниження чіткості і помітності мерехтінь використовується черезрядкова розгортка на два поля з частотою 50 Гц по 312,5 рядків в кожному. Сумарний кадр з 625 рядками формується з частотою 25 Гц, що зменшує частотну смугу сигналу в 2 рази до 6,5 МГц. Сучасні технічні засоби дозволяють ефективно працювати з більшою кількістю рядків телевізійного растру (телебачення високої чіткості).

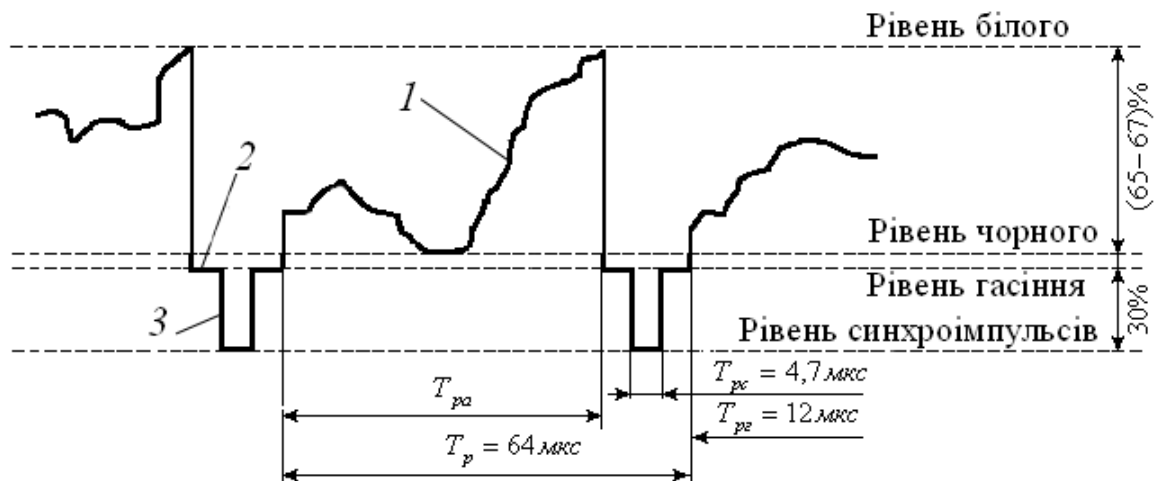
Одним з найважливіших якісних параметрів зображення є контраст K_z . У найпростішому випадку його можна визначити як відношення максимальної яскравості зображення $L_{\max}$ до мінімальної яскравості $L_{\min}$:

$$K_z = \frac{L_{\max}}{L_{\min}} .$$

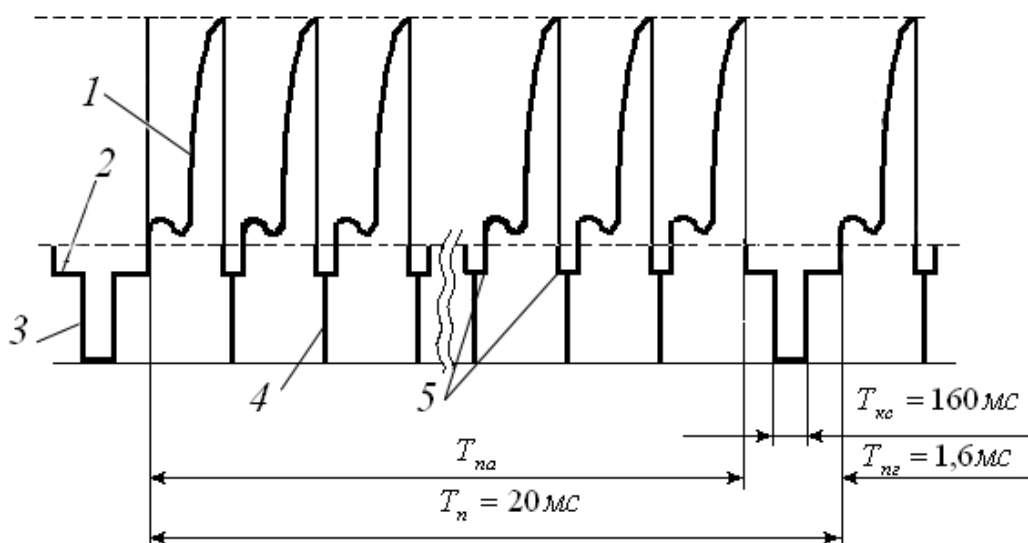
Контраст визначає кількість розрізняваних градацій яскравості зображення. При цьому необхідно враховувати, що зорова система реагує не на абсолютне значення зміни яскравості ΔL а на її відносний приріст $\Delta L/L$. Діапазон порогових для зорової системи градацій яскравості становить $(\Delta L/L)_n$ від 0,02 до 0,05. При заданому контрасті спостерігач може сприйняти на зображенні цілком певну кількість рівнів змін яскравості (порогових градацій яскравості). Наприклад, при характерних для телевізійних зображень значеннях параметрів $K_z = 100$ і $(\Delta L/L)_n = 0,02$ максимально можлива кількість ефективно відтворених градацій дорівнює:

$$\mu = \frac{\ln K_z}{(\Delta L / L)_n} = \frac{\ln 100}{0,02} = 230 .$$

Повним телевізійним сигналом називають сигнал зображення з доданими до нього сигналами гасіння і синхронізації розгорток. На рис. 1.1 показаний вид повного телевізійного сигналу в рядку і в кадрі.



а)



б)

Рис. 1.1. Форма повного телевізійного сигналу каналу яскравості:

а) рядковий сигнал: 1 - сигнал зображення; 2 - гасний рядковий імпульс; 3 - рядковий синхроімпульс;

б) сигнал поля кадру: 1 - сигнал зображення; 2 - гасний кадровий імпульс; 3 - кадровий синхроімпульс; 4 - рядковий синхроімпульс; 5 - гасний рядковий імпульс

Для чорно-білої передавальної камери сигналом зображення є сигнал яскравості. Він формує активну частину рядка T_{pa} (рис. 1.1,а). Яскравість є уніполярною фізичною величиною. Відповідно сигнал зображення має постійну складову, пропорційну середній яскравості зображення. При цьому за позитивну полярність сигналу береться така полярність, при якій максимальне значення сигналу відповідає максимальній яскравості (т.зв. «рівень білого»), а за негативну - полярність, при якій максимальне значення сигналу відповідає

мінімальній яскравості (т.зв. «рівень чорного»). Розмах сигналу зображення між реальними рівнями білого і чорного характеризує максимальний контраст зображення.

У камерах і ВКП з електронно-променевими трубками сигнал гасіння призначений для замикання променів приймальних трубок (кінескопів) під час зворотних ходів розгортки. Він складається з сукупності П-подібних рядкових гасних імпульсів тривалістю $T_{pg}=12$ мкс і П-подібних гасних імпульсів полів тривалістю $T_{ne}=25 \cdot T_{pg}=1600$ мкс. Таким чином з 625 рядків телевізійного растру 50 рядків витрачаються на два зворотні ходи кадрової розгортки і не використовуються для побудови зображення. Тобто в кожному з двох полів кадру тривалість активної частини T_{na} менше тривалості всього поля T_n на тривалість 25 рядків ($T_{na}=287,5 \cdot T_p$). Полярність і розмах сигналу гасіння вибираються такими, щоб вершини П- подібних імпульсів знаходилися на рівні гасіння - на (0 - 5) % нижче за рівень чорного.

Сигнал синхронізації призначений для жорсткої синхронізації розгортки ВКП з відповідними розгортками передавальної камери ОЕСС. Він складається з сукупності П - подібних рядкових синхроімпульсів тривалістю $T_{pc}=4,7$ мкс і кадрових тривалістю $T_{kc}=2,5 \cdot T_p = 160$ мкс. При черезрядковій розгортці початки двох полів зсунуті одне відносно другого на половину рядка. Тобто початки кадрових синхроімпульсів непарних полів будуть співпадати з початками відповідних рядкових синхроімпульсів, а початки кадрових синхроімпульсів парних полів попадають на середину між рядковими синхроімпульсами. Для розрізнення кадрових синхроімпульсів парних і непарних полів, в них зроблено п'ять імпульсів врізань з подвійною рядковою частотою тривалістю 4,7 мкс кожен. Для однакових умов виділення синхроімпульсів парних і непарних полів в приймач перед цими імпульсами і після них передаються дві послідовності з п'яти вирівнюючих імпульсів з подвійною рядковою частотою і тривалістю 2,35 мкс кожен. Сигнали синхронізації передаються під час проходження відповідних гасних імпульсів в області рівнів нижче за рівень гасіння. Розмах сигналу синхронізації встановлюється рівним 30% від розмаху повного телевізійного сигналу.

Таким чином, інформаційний сигнал зображення і службові сигнали розділені в часі і по амплітуді. Сигнал зображення може приймати будь-які значення від рівня білого до рівня чорного, а службові сигнали - будь-які значення від рівня чорного до рівня синхроімпульсів. Розділення інформаційних і службових сигналів в часі і по динамічному діапазону дозволяє надійно ізолювати їх один від одного і уникнути взаємних завад.

До основних типів спотворень телевізійного сигналу відносяться координатні (геометричні) спотворення, низькочастотні, високочастотні та нелінійні спотворення. Оцінку величин спотворень зображення в передавальних камерах зазвичай проводять за допомогою телевізійних випробувальних таблиць (наприклад, ТИТ- 0249, EIA Resolution Chart (рис. 1.2)).

Координатні спотворення зображення проявляються в порушеннях геометричної подібності зображення по відношенню до об'єкта. В ОЕСС з матричними приймачем випромінювання і ВКП причиною цих спотворень є неідентичність форматів кадру передавального і приймального блоків. При цьому виникає рівномірна по всьому полю зміна масштабу зображення по горизонталі або по вертикалі. Порушення геометричної подібності (бочкоподібність, подушкоподібність, трапецеїдальні спотворення тощо) майже відсутні в матричних системах з жорстким растром за умови використання об'єктивів з виправленою дисторсією.

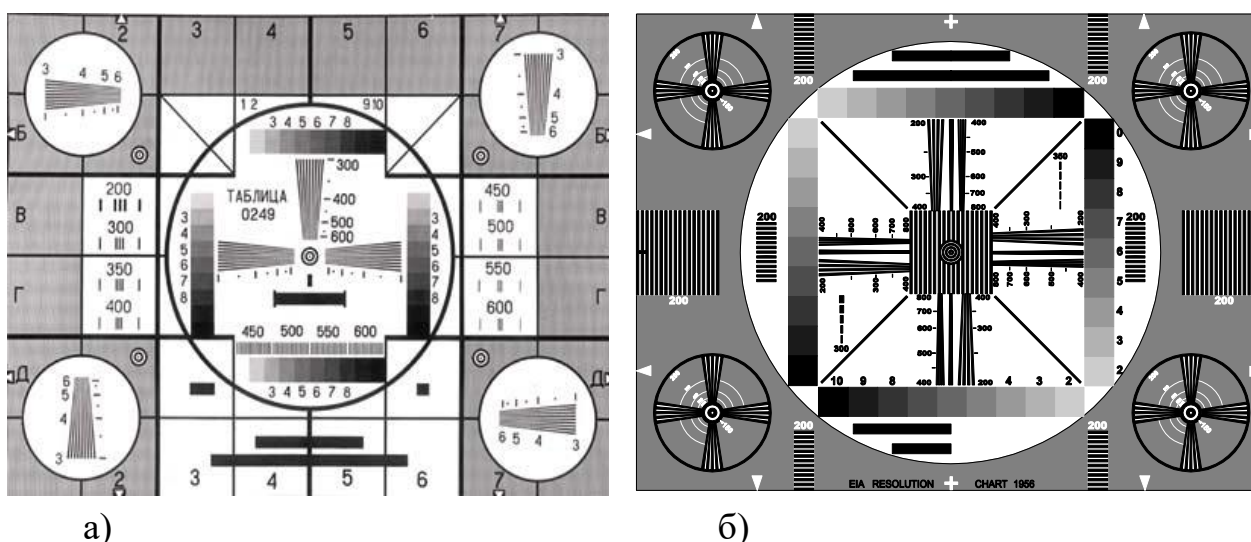


Рис. 1.2. Вигляд деяких тестових таблиць для визначення геометричних викривлень зображень: а) ТИТ- 0249; б) EIA Resolution Chart

Спотворення низькочастотних складових сигналу зображення у вигляді т.зв. «тягнучок» уздовж рядка растру були характерними для електронно-променевих приладів. Для матричних приладів ці спотворення практично неістотні. Високочастотні спотворення сигналу зображення зумовлюють зміну чіткості зображення і появу помилкових деталей на зображенні (наприклад, оконтурювання). Ці спотворення визначаються амплітудно-частотними характеристиками передавальної камери. Фундаментальна взаємна пов'язаність просторового розділення з відношенням сигнал/шум в зображенні викликає

залежність амплітудно-частотної характеристики передавальної камери від діафрагмування об'єктиву камери.

Для ОЕСС з матричними приймачами випромінювання властиві похибки дискретизації - биття просторових частот, утворених дискретною структурою матриці фотоприймача і періодичними елементами в полі зору. Такі похибки можуть проявлятися у вигляді муарових картин або маскуванню періодичних структур на зображеннях.

Нелінійні спотворення сигналу зображення виникають внаслідок нелінійної форми амплітудної характеристики (малого динамічного діапазону) передавальної камери і проявляються в зміні контрасту деталей зображення, кількості відтворюваних півтонів. Взагалі енергетичні і геометричні характеристики ОЕСС є взаємопов'язаними. Особливо це помітно при зміні відносного отвору об'єктиву передавальної камери: поступове діафрагмування об'єктиву спочатку може підвищувати глибину модуляції зображення, а потім при недостатньому освітленні об'єкту – знижувати її.

Схема лабораторної установки

Схема лабораторного стенду представлена на рис.1.3. Стенд складається з ОЕСС, блоку тестових об'єктів, вимірювальних пристроїв.

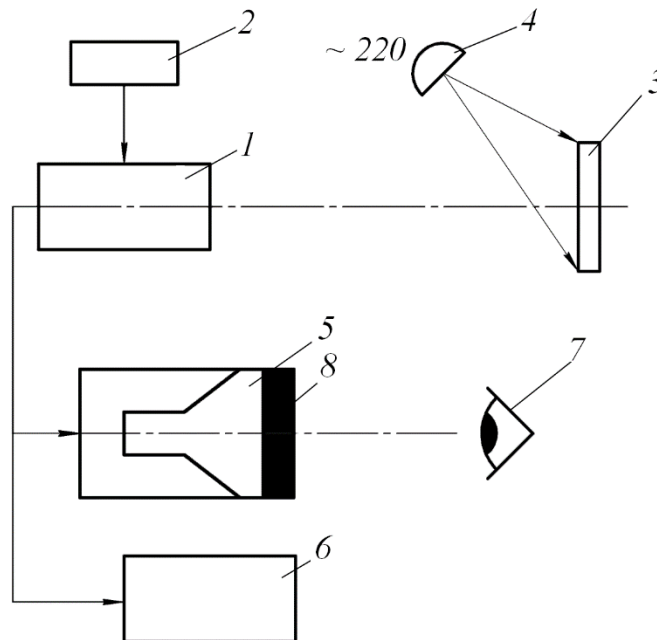


Рис. 1.3. Схема лабораторної установки: 1 - передавальна камера; 2 - блок живлення; 3 - випробувальна таблиця; 4 - освітлювач; 5 - ВКП; 6 - осцилограф; 7 – зорова система оператора; 8 - площина зображення випробувальної таблиці (екран ВКП)

Сигнал зображення знімається з виходу передавальної телевізійної камери 1, яка спостерігає випробувальну таблицю 3, що розташована на планшеті та освітлюється освітлювачем 4. Передавальна телевізійна камера 1 формує стандартний телевізійний відеосигнал, форму якого можна спостерігати на екрані осцилографа С1-81. Осцилограф С 1-81 працює у режимі виділення рядка, що дозволяє отримати осцилограму сигналу з вибраного рядка. Зображення, що відповідає повному відеосигналу, спостерігається оператором на екрані ВКП 5.

Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи

В ході виконання лабораторної роботи використовуються прилади, що підключені до електричної мережі. Виконавцям роботи необхідно дотримуватись правил безпеки, що викладені в додатку 1 до методичних вказівок.

Порядок виконання роботи

1. По методичним вказівкам, конспекту лекцій та літературі з'ясувати мету та зміст роботи, ознайомитись із схемою лабораторної установки (рис.1.3). Ввімкнути макет та осцилограф. Вивчити правила роботи з осцилографом за додатком 2.

2. На планшеті закріпити випробувальну таблицю EIA Resolution Chart.

3. Налаштувати телевізійну передавальну камеру, ВКП і освітлювач для досягнення нормального зображення на екрані ВКП (при необхідності налагодження передавальної камери проводить викладач). При подальшому виконанні лабораторної роботи положення органів регулювання ВКП і освітлювача має залишатись незмінним.

4. Замалювати осцилограми телевізійних сигналів та зображення, що їм відповідають на ділянках горизонтального градаційного клину та вертикальних штрихових мір у центральному колі випробувальної таблиці.

5. Виміряти на осцилограмі основні часові параметри – тривалість повного рядка, тривалість гасних і синхронізуючих імпульсів.

6. Оцінити приблизне значення верхньої частоти телевізійного сигналу за тривалістю t_{min} найкоротшого фронту сигналу випробувальної таблиці ($f_{max}=0,5t_{min}$).

7. Оцінити по осцилограмі залежність глибини модуляції контрасту на ділянці вертикальних штрихових мір у центральному колі випробувальної таблиці (450 елементів розкладу) від значення діафрагми об'єктива камери. Побудувати графік цієї залежності. Дати пояснення отриманим результатам.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Схему макету.
2. Два рисунки осцилограм відеосигналу випробувальної таблиці (із наведенням основних параметрів) та відповідних їм зображень таблиці. Пояснення форми відеосигналу.
3. Розрахунок значення верхньої частоти телевізійного сигналу.
4. Графік залежності глибини модуляції контрасту від значення діафрагмового числа об'єктива камери.
5. Висновки.

Контрольні питання

1. Закони та засоби здійснення розгортки зображення.
2. Форма та рівні відеосигналу.
3. Принцип роботи матричного ПЗЗ.
4. Загальні відомості про стандартні випробувальні таблиці для оцінки якості телевізійного зображення.
5. Характеристики та параметри телевізійних систем.
6. Вплив окремих блоків ОЕСС на якість телевізійного зображення.
7. Класифікація та структурна схема прикладних телевізійних систем.

Лабораторна робота №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗОРОВОГО СПРИЙНЯТТЯ ПРИ СПОСТЕРЕЖЕННЯХ ЗА ДОПОМОГОЮ ОЕСС

Мета роботи: Ознайомлення з основними законами зорового сприйняття телевізійних зображень та оцінкою їх якості. Отримання практичних навичок у вимірюванні деяких характерних співвідношень між параметрами зображень.

Завдання

1. Ознайомитись з методами об'єктивної та суб'єктивної оцінки якості телевізійних (ТВ) зображень.
2. Виміряти залежності порогового контрасту від кутових розмірів простих геометричних фігур.
3. Дослідити вплив орієнтації протяжних об'єктів на значення порогового контрасту.
4. Дослідити інтегрувальну здатність зорової системи при растровому характері зображення.

Прилади та обладнання

1. Телевізійна камера зовнішнього спостереження з ПЗЗ-матрицею.
2. Відеоконтрольний пристрій (ВКП).
3. Планшет з набором тест-мір.
4. Освітлювач на базі лампи розжарення змінної яскравості.
5. Люксметр.
6. Фотометр.

Основні положення

1. Методи оцінки якості ТВ зображень в ОЕСС

Особливістю зображень, що створюються ТВ ОЕСС, є, перш за все, представлення їх оператору в реальному масштабі часу. Тобто, проміжні операції по передаванню візуальної інформації від об'єкту до оператора виконуються дуже швидко, й оператор спостерігає процеси, що відбуваються у просторі об'єктів, практично без затримки у часі. Друга важлива особливість – специфічні завдання, які виконує оператор: зазвичай це виявлення або розпізнавання відомого об'єкту серед набору інших об'єктів. Тому, у порівнянні

з художнім телебаченням, ОЕСС можуть створювати зображення більш низької якості та при цьому добре виконувати свої функції. У зв'язку з цим поняття «якість зображення» для ОЕСС оцінюється набором властивостей, що дозволяють оператору системи найкращим чином виконати поточну задачу, і це поняття не є тотожним якості ОЕСС.

Існують дві групи методів визначення якості зображень (або ТВ систем): *об'єктивні* та *суб'єктивні*. Перша група базується на використанні вимірних приладами параметрів зображення (або системи) для подальшого обчислення величини, добре корельованої із сприйняттям даного зображення людиною. До цієї групи відноситься широкий спектр часткових показників якості (окремі властивості зображення): чіткість, різкість границь, контраст, відношення сигнал/шум, середня яскравість зображення, кількість градацій яскравості та кольорів, кутовий розмір зображення, частота мерехтіння (при кадровій розгортці) та ін., а також інтегральні показники якості. Наприклад, об'єктивний показник якості, що характеризує чіткість та різкість зображення, можна отримати на основі модуляційної передаточної функції (МПФ) системи. Поширеним показником якості є еквівалентна смуга частот пропускання ТВ системи, введена О.Шаде, яка дорівнює інтегралу від квадрату МПФ системи.

До переваг об'єктивних показників якості відносяться простота їх вимірювання, можливість аналітичних розрахунків, незалежність від індивідуальних властивостей спостерігача. Останнє є перевагою у задачах порівняння різних систем, але при оцінці споживчих властивостей системи перетворюється у недолік. Насправді, якщо якість системи визначається ступенем успіху у виконанні оператором свого завдання, то виникає питання, наскільки повно об'єктивні показники задовольняють вимогам та можливостям оператора. Цим викликане поширення так званих суб'єктивних показників якості, що базуються на результатах проведення суб'єктивних експертиз з великою кількістю операторів. По результатах проведення суб'єктивних експертиз встановлені пороги зорового сприйняття по енергетиці (порогові контраст та блиск), по часу (порогова частота мерехтіння, стала часу зорової системи), по просторових частотах (мінімальні кутові розміри об'єкту, що виявляється) та інші. Ці пороги можна пов'язати з об'єктивними показниками якості та отримати достовірні характеристики зображень. Але частіше суб'єктивні експертизи використовують для безпосереднього вимірювання споживчих характеристик ОЕСС.

Якщо перед оператором ставиться завдання виявити або розпізнати об'єкт, то використовуються поняття ймовірності правильного виявлення та

ймовірності правильного розпізнавання зображення об'єкту (іноді, час виявлення або розпізнавання). Ці величини є результатом взаємодії багатьох параметрів, які характеризують об'єкт та фон, середовище поширення випромінювання, систему візуалізації, зорову систему оператора та умови спостереження.

В цій лабораторній роботі розглядаються особливості зорового сприйняття оператором як останньою ланкою системи «фоно-цільова обстановка - ОЕСС - оператор».

2. Закони зорового сприйняття

Умовно закони зорового сприйняття монохромного зображення можна поділити на просторово-енергетичні, часові, просторово-часові. До законів також можна віднести стійкі емпіричні залежності порогових величин зображення.

Закон Вебера – пороговий контраст у широкому діапазоні яскравостей є сталою величиною, що дорівнює від 2% до 5%:

$$K_n = \frac{\Delta L_n}{L} = const,$$

де L – середня величина яскравості; ΔL_n - пороговий приріст яскравості над середньою величиною L ; K_n - пороговий контраст.

Закон Вебера-Фехнера – світність (зорове сприйняття яскравості) є пропорційною логарифму самої яскравості:

$$C - C_1 = a \cdot \ln\left(\frac{L}{L_1}\right),$$

де C и C_1 – значення світностей, що відповідають яскравостям L та L_1 ; a - сталий коефіцієнт.

Цей закон пояснює великий динамічний діапазон зорової системи (від $3 \cdot 10^{-5}$ кд/м² до $3 \cdot 10^5$ кд/м²) - діапазон у 10 порядків звужується при логарифмуванні сигналу у процесі його обробки в мозку.

Закон Тальбота – визначає усереднене відчуття яскравості при спостереженні зображення, яке мерехтить з частотою, вище критичної частоти мерехтіння (тобто максимальної частоти, яку оператор ще здатний помітити):

$$L = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} L(t) dt,$$

де t_1 - тривалість одного кадру зображення.

Закон Феррі-Портєра – виражає залежність критичної частоти мерехтіння від середньої яскравості L мерехтіння поля:

$$f_{кр} = a \cdot LgL + b,$$

для характерних у телебаченні екранів $a=9,6$, $b=26,6$.

Найважливіші порогові залежності для зорової системи людини пов'язують пороговий контраст K_n , кутовий розмір зображення Y_n , яскравість фону L_ϕ та час спостереження t . Використовуються різні емпіричні залежності. У ранніх роботах закордонних авторів дано:

$$(Y_n - 0,4) \cdot (K_n - K_0)^{0,57+0,69 \cdot 10^{-4}} \cdot L_\phi^{0,18} + 0,24 = \delta,$$

де K_0 - абсолютний пороговий контраст при тривалому спостереженні (дорівнює 0,01 для низьких значень L_ϕ та 0,02 для середніх та високих); $\delta = 0,79$ для тренованого оператора та 1 - для нетренованого.

Результати більш пізніх робіт дослідників показують:

$$Y_n (K_n - 0,02)^{2/3} = 0,44 + 0,63 L_\phi^{-0,42}.$$

Загальновизнаним фактором також є експоненціальна залежність зорових відчуттів від відносного часу спостереження t/t_τ :

$$K_n = \frac{K_0}{1 - e^{-\frac{t}{t_\tau}}},$$

де t_τ - стала інерції зорової системи (від 0,05 до 0,2); K_0 - пороговий коефіцієнт при $t = \infty$.

Схема лабораторної установки

Лабораторна установка, схема якої приведена на рис. 2.1.

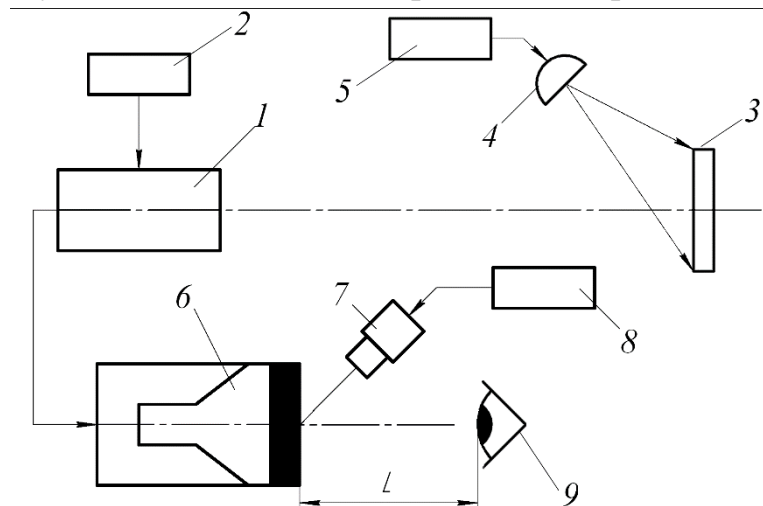


Рис. 2.1. Схема лабораторної установки: 1 – передавальна камера; 2 – блок живлення камери; 3 – планшет, на якому встановлюються тест-міри; 4 – освітлювач; 5 – блок живлення з вихідною напругою, яка регулюється; 6 – ВКП; 7 – фотометр; 8 – блок живлення та індикації фотометру; 9 – око спостерігача

Вона складається з передавальної камери 1 із блоком живлення 2 та ВКП 6, планшету 3 з освітлювачем 4. Для вимірювання використовують люксметр 7, рулетку та фотометр 8.

На планшеті 3 встановлюються випробувальні тест-міри (рис. 2.2), освітленість яких змінюється регулюванням напруги блока живлення 5. Зображення тест-міри розглядається оператором 9 на екрані ВКП 6.

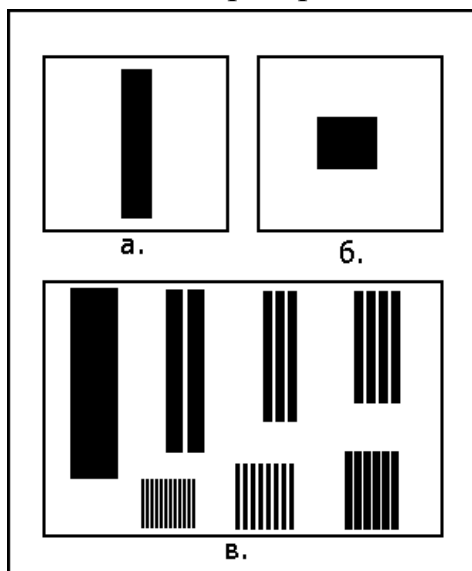


Рис. 2.2. Типи тест-об'єктів, що використовуються: а) – чорна смуга, орієнтована під кутом до горизонту; б) – чорний квадрат; в) – штрихові міри

Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи

В ході виконання лабораторної роботи використовуються прилади, що підключені до електричної мережі. Виконавцям роботи необхідно дотримуватись правил безпеки, що викладені в додатку 1 до методичних вказівок.

Порядок виконання роботи

1. Дослідження залежності порогового контрасту від кутового розміру зображення об'єкту

У експерименті беруть участь 2-3 студенти, які по чергово виконують функції оператора (О) та експериментатора (Е).

1. За методичними вказівками, конспектом лекцій та літературою з'ясувати мету та зміст роботи, ознайомитись із схемою (рис.2.1). Ознайомитись з послідовністю роботи з люксметром (додаток №3) і фотометром (додаток №4).

2. Ввімкнути макет.

3. *O* сідає перед екраном ВКП на зручній для себе відстані. Відстань від очей *O* до екрану ВКП вимірюють рулеткою, заносять у таблицю, ця відстань не повинна змінюватись на протязі всього експерименту.

4. *E* встановлює мінімальну освітленість площини предметів (планшет 3).

5. *O* встановлює ручкою регулювання яскравості ВКП середнє значення яскравості та спостерігає на протязі хвилини порожній екран ВКП. Впродовж експерименту положення ручки регулювання яскравості має лишатися незмінним.

6. *E* встановлює на планшеті 3 найменшу тест-міру з першого набору (чорний квадрат на білому фоні з стороною квадрату a , рис.2.2, б).

7. *E* поступово збільшує освітленість тест-міри (регулювання яскравості виконується поступово і періодично через (15 – 20) с зміною напруги на блоці живлення 5).

8. *O* спостерігає за екраном ВКП. У момент візуального виявлення зображення тест-об'єкту *O* повідомляє про це *E*.

9. *E* вимірює люксометром освітленість тест-міри та фотометром – яскравість зображення об'єкту та фону на екрані ВКП 6 (рис.2.3). Дані заносяться до табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Результати вимірювань

Набір тест-мір №						
Дистанція спостереження $L =$ мм						
№ міри	Y_i або α°	Освітленість тест-міри, лк	Яскравість фону, кд/м ²	Яскравість об'єкту, кд/м ²	Пороговий контраст	$Y' \cdot K_n$

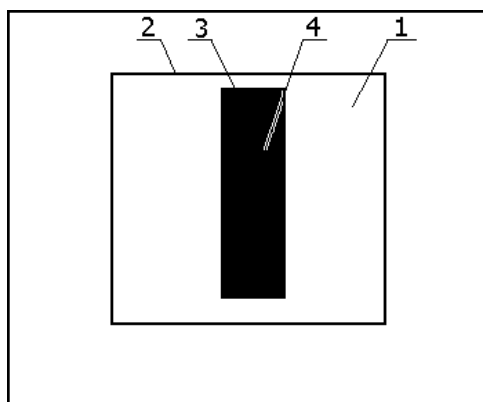


Рис. 2.3. Зображення тест-об'єкту на екрані ВКП: 1– точка вимірювання яскравості фону; 2 – границя екрану; 3 – зображення тест-об'єкту; 4 – точка вимірювання яскравості об'єкту

10. *E* зменшує освітленість планшету 3 до мінімуму та замінює попередню тест-міру наступною (більшою за розмірами).

11. Далі повторюються пп. 4 - 6, поки не буде вичерпаний увесь набір тест-мір.

Кутові розміри зображення тест-міри (Y_i , у кутових хвилинах) розраховуються за формулою:

$$Y_i = 6875 \cdot \arctg \frac{a_i}{2L}, \quad (2.1)$$

де a_i - довжина сторони квадрату зображення i -тої тест-міри на екрані ВКП; L - дистанція спостереження, та заносяться до табл. 2.1.

Порогові контрасти для кожної тест-міри, які також заносяться до табл. 2.1, розраховуються за формулою:

$$K_{ni} = \frac{L_{\phi i} - L_{0i}}{L_{\phi i}}, \quad (2.2)$$

де $L_{\phi i}, L_{0i}$ - яскравості фону та зображення тест-об'єкту на екрані ВКП відповідно.

Залежності $K_n(Y_i)$ та $Y_i \cdot K_{ni}$ оформлюються у вигляді графіків по експериментально отриманих даних*.

2. Дослідження впливу орієнтації протяжних об'єктів на величину порогового контрасту

1. Виконуються пп. 1, 2 попереднього експерименту.

2. *E* встановлює на планшеті одну тест-міру з другого набору (чорний прямокутник на білому фоні, розташований під кутом α° до горизонталі (рис.2.2, а); $\alpha_i - \alpha_{i-1} = 10^\circ$).

3. Виконуються пп. 4 - 7 попереднього експерименту.

*** Примітки:**

1. Оскільки вимірювання є досить громіздкими, а кількість людей, що приймає участь в експерименті, обмежена, статистична обробка результатів прямих та непрямих вимірювань у рамках даної лабораторної роботи не проводиться. Дане питання входить у програму здачі заліку по курсу.

2. В ході проведення експерименту необхідно виключити будь-яку можливість впливу на контраст ТВ зображення, крім регулювання освітленості планшету 3 джерелом підсвітки. Неможна: зміщувати ТВ камеру 1, регулювати яскравість та контраст ВКП, змінювати діафрагмове число об'єктиву тощо.

4. E та O міняються місцями. Повторюються пп.1- 3.

5. Кожний E по індивідуально отриманих даних оформлює табл. 2.2, аналогічну табл. 2.1, та будує графік залежності порогового контрасту K_n (розраховується по формулі (2.2)) від кута нахилу штриха α .

3. Дослідження просторової інтегрувальної здатності зору при растровому характері зображення

Експеримент виконується з тест-мірами третього набору (рис. 2.2, в) – періодичними штриховими мірами зі змінною просторовою частотою. В наборі є 10 штрихових мір з просторовими частотами від $0,1 \text{ мм}^{-1}$ до 1 мм^{-1} , або від $0,2 \text{ мм}^{-1}$ до 2 мм^{-1} . Просторові частоти кожної i -тої міри отримують добутком $0,1 \cdot i$ або $0,2 \cdot i$, відповідно.

1. Виконуються пп. 1, 2 першого експерименту.

2. E встановлює на планшеті заданий викладачем набір тест-мір так, щоб штрихи були перпендикулярні рядкам растру ВКП.

3. Шляхом зміни яскравості джерела підсвітки та спостереження зображення тест-міри на екрані ВКП O та E знаходять порогові значення освітленості тест-об'єкту для першої та десятої мір.

4. Цей діапазон регулювань яскравості розбивається на 5-6 піддіапазонів. O по чергово змінює освітленість тест-міри від найменшої освітленості до максимальної.

5. При кожному значенні освітленості O повідомляє найбільший номер міри, зображення штрихів якої він бачить роздільно. Дані заносяться у таблицю разом із контрастом міри (максимальної просторової частоти, яка ще сприймається роздільно) при цій освітленості.

6. Розраховуються кутові розміри зображення одного штриха (у горизонтальній площині) для кожної міри за формулою (2.1).

7. O та E міняються місцями.

8. Проводяться вимірювання та розрахунки за пп. 1 - 6.

9. Будуються графічні залежності порогового контрасту від просторової частоти зображення тест-мір та освітленості предмету від номеру міри, штрихи якої спостерігаються окремо.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Схему макету.

2. Графіки залежності порогового контрасту K_n від кутових розмірів Y_i

зображення тест-міри.

3. Графік залежності порогового контрасту K_n від кута нахилу штриха α .

4. Графіки залежності порогового контрасту від просторової частоти зображення тест-мір, та освітленості предмету від номеру міри, штрихи якої спостерігаються окремо.

5. Висновки.

Контрольні питання

1. Які параметри та критерії використовуються для оцінки якості ТВ зображень? Порівняйте ефективність використання об'єктивних та суб'єктивних показників якості зображення.

2. Що таке порогові характеристики зорового сприйняття?

3. Перерахувати та пояснити основні закони зорового сприйняття ТВ зображення.

4. На яких етапах проектування та в яких параметрах ТВ систем враховуються закони та характеристики зорового сприйняття?

5. Показати, на яких етапах виконання лабораторної роботи використовується суб'єктивна експертиза, а на яких - об'єктивне вимірювання.

6. Порівняйте результати першого та третього експериментів. Вказати роль статистичної обробки даних при дослідженні якості ТВ відображення.

Лабораторна робота №3

ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВІЗОРА НА ПІРОВІДІКОНІ

Мета роботи: Ознайомлення з основними характеристиками тепловізорів та методами їх вимірювання, набуття навичок роботи з тепловізором на піровідіконі.

Завдання

1. Ознайомитись з теоретичними основами роботи тепловізорів на піровідіконі та з критеріями оцінки якості тепловізійного зображення.
2. Виміряти мінімальну виявлювальну різницю температур.
3. Виміряти мінімальну роздільну різницю температур.
4. Побудувати просторово-частотну температурну характеристику тепловізора.

Прилади та обладнання

1. Тепловізор «Піровідікон – 03».
2. ВКП.
3. Імітатор теплових полів (фоновий випромінювач, температура якого може змінюватись, набір тест-об'єктів, блок переміщення каретки тест-об'єкту).
4. Блоки живлення.
5. Осцилограф С1-81.

Основні положення

Тепловізор складається, як мінімум, з тепловізійної передавальної камери і відеоконтрольного пристрою (ВКП). Тому, подібно до телевізійних систем (див. лаб. роб. №2), можна виділити так звані об'єктивні і суб'єктивні характеристики тепловізора. В першому випадку вимірювання можна здійснювати і на виході передавальної камери, і на виході ВКП. В другому випадку вимірюються характеристики всього тепловізора на виході ВКП. До основних характеристик тепловізорів відносяться:

1. *Еквівалентна шуму різниця температур NETD* (Noise Equivalent Temperature Difference) – це різниця температур між стандартним тест-об'єктом та фоном, що випромінюють як АЧТ, при якій відношення пікового сигналу до середньоквадратичної величини шуму на виході підсилювача відеосигналу дорівнює одиниці. Параметр *NETD* залежить від температури фону T_{ϕ} , тому більш повним параметром температурної чутливості слід вважати функцію

$NETD$ (T_ϕ). Тест-об'єкт у вигляді квадрату повинен мати кутові розміри у декілька разів більші за кутове розділення тепловізора, для того щоб нівелювати вплив просторового розділення на результати вимірювань.

2. *Мінімальна виявлювальна різниця температур MDTD* (Minimum Detectable Temperature Difference) – це мінімальна різниця температур між тест-об'єктом та фоном, що випромінюють як АЧТ, яка необхідна для виявлення зображення тест-об'єкту на екрані ВКП при необмеженому часі спостереження та заздалегідь відомому його положенні. При вимірюваннях використовується тест-об'єкт, аналогічний до тест-об'єкту для вимірювання $NETD$. На відміну від попередньої характеристики, для визначення MDTD необхідно залучати оператора-спостерігача. Тому цю характеристику можна віднести до суб'єктивних.

3. *Мінімальна роздільна різниця температур MRTD* (Minimum Resolvable Temperature Difference) – це мінімальна різниця ефективних температур між штрихами тест-об'єкту з заданою просторовою частотою та фоном, яка дозволяє візуально на екрані ВКП спостерігати роздільно штрихи тест-об'єкту. Тест-об'єктом в даному випадку є чотириштрихова міра, в якій ширина смуги дорівнює ширині проміжку, а висота у сім разів більша за ширину смуги. Вважається, що смуги та проміжки випромінюють як АЧТ, але з різною температурою. Ця характеристика також вимірюється в результаті суб'єктивних експертиз.

4. *Передавальна функція ПФ* $H(v_x, v_y)$ тепловізора є нормованим двовимірним перетворенням Фур'є від функції розсіювання точки (від розподілу яскравості на екрані ВКП у зображенні точкового джерела випромінювання). Функція $H(v_x, v_y)$ характеризує поведінку тепловізора в області просторових частот і визначається залишковим контрастом зображення міри з періодичною структурою і контрастом самої міри, що дорівнює одиниці. Модуль ПФ називається *модуляційною передавальною функцією (МПФ)* $M(v_x, v_y)$:

$$|H(v_x, v_y)| = M(v_x, v_y).$$

Поняття ПФ справедливе лише для інваріантних систем. Тепловізор при невеликих температурних контрастах у межах малого поля зору можна вважати інваріантною системою. Експериментальні та теоретичні дослідження свідчать про те, що МПФ більшості тепловізорів досить точно описується гаусовою функцією $M_T(v_x) = \exp(-2\pi^2 r_T^2 v_x^2)$, де v_x - просторова частота в напрямку сканування зображення системою розгортки; r_T - радіус на рівні 0,606 від максимального значення функції розсіювання точки;

5. *Функція передачі сигналу STF* (Signal Transfer Function) $U_T(T)$ - це залежність електричного сигналу на виході підсилювача від ефективної температури об'єкта спостереження. Функція $U_T(T)$ застосовується при температурних вимірюваннях, коли вимірюваному сигналу U_T ставиться у відповідність температура T поверхні об'єкту.

6. *Кутове поле зору, кутове розділення.*

Здатність тепловізора розрізняти розміри елементів температурно-градаційної картини оцінюється за кутовим або лінійним розділенням. Кутове розділення визначається як граничний кутовий розмір смуги або щілини, що реєструється на фоні поверхні зі сталою заданою температурою. Кутове розділення можна визначити на основі МПФ як обернену величину напівперіода граничної просторової частоти, на якій ще розрізняється мінімальний температурний контраст. Температурний контраст або перепад між смугою та фоном може змінюватись.

На основі кутового розділення може бути визначене лінійне розділення, яке залежить від відстані між тепловізором та об'єктом. Тому лінійне розділення краще визначати для невеликої робочої відстані.

Вимірювання параметрів тепловізорів

Еквівалентна шуму різниця температур

Для вимірювання NETD у полі зору тепловізора розташовуються на одному рівні й у одній площині 2 кювети з водою, що мають перепад температури, який у 5 - 10 разів перевищує очікувану NETD й на (5 – 10) К вище температури оточуючого середовища. Потім фіксують термопрофіль обох кювет. Знаючи різницю температур ΔT між кюветами, пікове значення напруги сигналу U_c , що вимірюється по термограмі, ефективне значення напруги шуму $(U_{ш1} + U_{ш2})/2$, також виміряне по термограмі, визначають NETD за формулою:

$$NETD = \Delta T (U_{ш1} + U_{ш2}) / 2U_c .$$

Мінімальна виявлювальна різниця температур

Вимірювання MDTD полягає у візуальному спостереженні квадратного тест-об'єкту (рис.3.1), розташованого перед фоновим випромінювачем значно більших розмірів. Розміри тест-об'єкту повинні бути більше або дорівнювати 100 мм. Спочатку температура T_ϕ фонового випромінювача та температура $T_{об}$ тест-об'єкту рівні. Поступово збільшуючи температуру тест-об'єкту, спостерігач

фіксує момент візуального виявлення зображення тест-об'єкта на екрані ВКП. Визначивши поточні значення температур T_{ϕ} і $T_{об}$, можна обчислити MDTD:

$$MDTD = T_{об} - T_{\phi}.$$

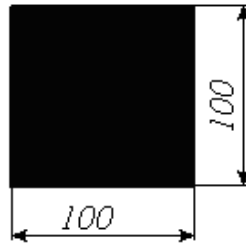


Рис. 3.1. Тест-об'єкт для вимірювання мінімальної виявлювальної різниці температур

Мінімальна роздільна різниця температур

Для вимірювання мінімальної роздільної різниці температур MRTD використовуються штрихові міри (рис. 3.2).

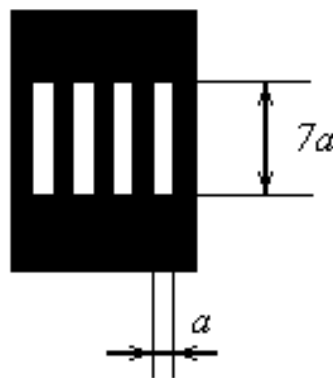


Рис. 3.2. Штрихова тест-міра для вимірювання мінімальної роздільної різниці температур

В полі зору тепловізора на відстані від 30 мм до 50 мм перед фоновим випромінювачем, температура якого є близькою до температури оточуючого середовища, встановлюють штрихову міру з найменшою просторовою частотою штрихів. Поступово збільшують температуру фонового випромінювача та записують значення отриманого перепаду температур у момент часу, коли штрихи розрізняються хоча б двома спостерігачами. Ці операції по чергові проводять з мірами більших просторових частот. За результатами вимірювань мінімальну роздільну різницю температур знаходять за формулою

$$MRTD = \varepsilon \Delta T ,$$

де ΔT – різниця температур штрихів та проміжків між ними, при якій штрихи розділяються на термограмі; ε – коефіцієнт теплового випромінювання поверхні кювети та тест-міри.

Просторову частоту міри ν_x розраховують за формулою:

$$\nu_x = R / 2af' ,$$

де a – ширина штриха; R – робоча відстань від об'єктиву до міри; f' – фокусна відстань об'єктиву тепловізора.

По отриманих даних можна побудувати функцію MRTD, яку інколи називають просторово-частотною температурною характеристикою $MRTD = f(\nu_x)$. В описаній методиці вимірювання MRTD в якості фонового випромінювача використовується кювета розмірами 330x250x75 мм³ з водою, що здатна повільно змінювати температуру. Для прискорення вимірів оптичних характеристик розроблені методи, в яких використовуються оптичні фільтри (рис. 3.3) з коефіцієнтом послаблення, що швидко регулюється при фіксованій різниці температур. Фільтри можуть бути виконані, наприклад, у вигляді поворотних сіток з квадратними отворами, що встановлені перед вихідним вікном тепловізора. Для вимірювання MRTD можна використати одномірний випромінювач типу тепловий клин, перед яким розташовується міра, а також малоінерційні фонові або стаціонарні випромінювачі.

Схема лабораторної установки

Лабораторна установка характеризується наступними технічними параметрами:

Діапазон відтворюваних радіаційних температур фонового випромінювача, град. Кельвіна	293 - 333
Похибка вимірювання різниці температур фонового випромінювача та тест-об'єкту, град. Кельвіна	0,5
Діапазон швидкості пересування тест-об'єкту, мм/с	10 - 300
Об'єktiv тепловізора: $f_0'=60$ мм, $D_0/f_0'=1:1$	
Тип піровіддікона - ЛІІ-492	

Функціонально лабораторна установка складається з двох частин (рис. 3.3): імітатора теплових полів та комплексу приладів для вимірювання вихідних сигналів тепловізора.

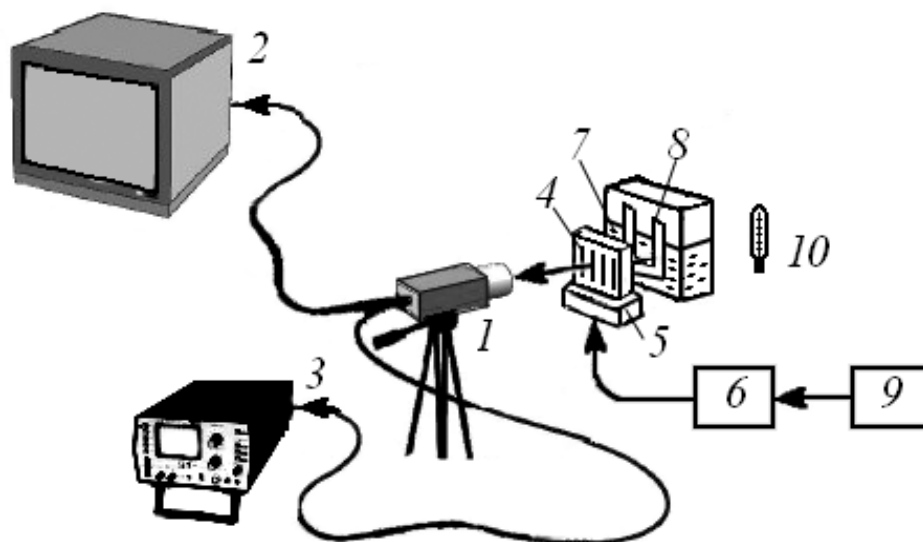


Рис. 3.3. Схема лабораторної установки для визначення параметрів тепловізора: 1 – тепловізійна камера; 2 – ВКП; 3 – осцилограф; 4 – тест-об'єкт; 5 – рухома каретка; 6 – пристрій пересування тест-об'єкта; 7 – фоновий випромінювач; 8 – електронагрівач; 9 – блок живлення; 10 – термометр

Імітатор теплових полів призначений для встановлення та підтримання із заданою точністю необхідної різниці температур між тест-об'єктом та фоновим випромінювачем, а також для пересування тест-об'єкту у полі зору тепловізора із заданою швидкістю.

Імітатор складається з джерела 7 фонового випромінювання, виконаного у вигляді металевої кювети, робочий бік якої покритий матовою емаллю АК-243, що має коефіцієнт випромінювання $\varepsilon = 0,97$. Кювета обладнана вбудованим нагрівачем 8, двигуном з крильчаткою для перемішування води всередині кювети. Температура фонового випромінювача (дорівнює температурі води в кюветі) вимірюється з допомогою термометра 10. Робоча поверхня тест-об'єкту також покрита емаллю АК-243. Тест-об'єкт 4 кріпиться на рухомій каретці 5 та розташовується на відстані від 40 мм до 50 мм від робочої поверхні фонового випромінювача. Рухома каретка 5 пересувається по напрямних під дією пристрою 6 пересування тест-об'єкту.

У комплект приладів для вимірювання вихідних параметрів тепловізора входять: ВКП 2 та телевізійний осцилограф 3 з вибором строки.

Робота стенду забезпечується блоками живлення, а також мережею змінного струму напругою 220 В.

Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи

В ході виконання лабораторної роботи використовуються прилади, що підключені до електричної мережі. Виконавцям роботи необхідно дотримуватись правил безпеки, що викладені в додатку 1 до методичних вказівок.

Порядок виконання роботи

1. *Вимірювання мінімальної виявлювальної різниці температур*

Вимірювання виконуються на установці, функціональна схема якої приведена на рис. 3.3.

1. За методичними вказівками, конспектом лекцій та літературою з'ясувати мету та зміст роботи, ознайомитись із схемою лабораторної установки (рис. 3.3). Вивчити правила роботи з осцилографом С1-81 за додатком 2.

2. Перед тепловізійною передавальною камерою 1 встановлюється фоновий випромінювач 7.

3. Кювета випромінювача 7 наповнюється холодною водою, температура якої має бути нижче за температуру повітря у приміщенні. У рухомій каретці 5 пристрою 6 пересування закріплюється квадратний тест-об'єкт (рис. 3.1). Температура тест-об'єкту вважається рівною температурі в приміщенні та незмінною в ході експерименту.

4. Вмикається тепловізійна камера 1 (*лише викладачем!*), ВКП 2, осциллограф 3, пристрій 6 пересування міри. Після виходу тепловізора у робочий режим на екрані ВКП 2 має спостерігатися світле зображення тест-об'єкта на темному фоні. Осциллограф в данному експерименті використовується для додаткового контролю телевізійного сигналу.

5. Для проведення експерименту бригада студентів розділяється на дві групи – операторів (*О*) та експериментаторів (*Е*). Перша група тільки спостерігає екран ВКП (при цьому не можна переводити погляд на яскраві об'єкти).

6. *Е* повільно збільшує температуру фонового випромінювача за допомогою нагрівача 8.

7. За сигналом *О* *Е* визначають (термометром 10) температуру T_1 , при якій зображення тест-об'єкта візуально зникає з екрана ВКП.

8. Нагрів води продовжується до тих пір, поки *О* не помітять на екрані ВКП темне зображення тест-об'єкта на світлому фоні (тест-об'єкт холодніше фонового випромінювача). В цей момент *Е* фіксують температуру води T_2 у фоновому випромінювачі.

Фактично значення MDTD, що визначається при зникненні зображення тест-об'єкта, і те, що визначається при появі зображення, мають бути різними виходячи з закономірностей зорового сприйняття. Але в загальному випадку допустимо обчислювати усереднену мінімальну виявлювальну різницю температур. Вона дорівнює:

$$MDTD = \frac{(T_2 - T_1)}{2}.$$

2. Вимірювання мінімальної роздільної різниці температур

Вимірювання цієї характеристики є продовженням роботи, що виконана у попередньому розділі.

1. З набору штрихових мір (рис. 3.2) у рухомій каретці 5 закріплюється міра 4 з найменшою просторовою частотою ν_{xi} (найбільшим періодом) та вмикається пристрій 6 пересування міри. Температура води в кюветі фонового випромінювача 7 має бути нижчою за температуру в приміщенні. О спостерігає роздільно зображення окремих штрихів міри на екрані ВКП.

2. Е повільно нагріває воду за допомогою нагрівача 8 з забезпеченням одночасного перемішування.

3. За сигналом О визначається температура $T_1(\nu_{xi})$, при якій роздільні зображення окремих штрихів міри перестають бути видимими.

4. Нагрів води продовжується до появи на екрані ВКП помітного зображення тест-об'єкта оберненого контрасту. В момент, коли О візуально можуть розрізнити роздільно зображення окремих штрихів міри, Е фіксує температуру води $T_2(\nu_{xi})$ у фоновому випромінювачі.

Усереднене значення MRTD для міри поточної просторової частоти визначається, як

$$MRTD(\nu_x) = \frac{T_2(\nu_{xi}) - T_1(\nu_{xi})}{2}.$$

5. У такому ж порядку виконують вимірювання для решти штрихових мір набору. За результатами вимірювань необхідно побудувати графік залежності $MRTD(\nu_{xi})$, де ν_{xi} - просторова частота зображення i -тої міри.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Схему макету.
2. Розраховане значення мінімальної виявлювальної різниці температур

3. Графік залежності мінімальної роздільної різниці температур від просторової частоти міри.
4. Висновки.

Контрольні питання:

1. Узагальнена схема тепловізійної системи.
2. Основні характеристики тепловізійної системи.
3. Методи вимірювання основних характеристик тепловізійних систем.
4. Які тепловізійні системи ви знаєте? Чим вони відрізняються?
4. Тепловізор «ПРОВІДІКОН-3». Принцип роботи і особливості піроприймачів.
5. Області застосувань тепловізійних систем.

Лабораторна робота №4

ВИМІРЮВАННЯ МОДУЛЯЦІЙНОЇ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ МІКРОБОЛОМЕТРИЧНОЇ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ КАМЕРИ

Мета роботи: Ознайомлення з основними методами вимірювання модуляційних передавальних функцій тепловізійних камер, набуття навичок роботи з тепловізором на мікроболометричній матриці.

Завдання

1. Ознайомитись з основами роботи тепловізійних камер на мікроболометричній матриці та з критеріями оцінки якості тепловізійного зображення.
2. Визначити модуляційну передавальну функцію тепловізійної камери за результатами вимірювань функції передачі контрасту штрихових мір.

Прилади та обладнання

1. Тепловізійна камера на базі мікроболометричної матриці.
2. Відеоконтрольний пристрій або комп'ютерний монітор з інтерфейсним блоком (фрейм грабером).
3. Імітатор теплових полів: фоновий випромінювач, температура якого може змінюватись, та набір штрихових тест-об'єктів.
4. Осцилограф С1-81.
5. Вимірювальна лінійка або рулетка.

Основні положення

Досить змістовним критерієм оцінки якості тепловізорів як зображуючих систем є *модуляційна передавальна функція* (МПФ). Ця функція є модулем передавальної функції $H(v_x, v_y)$:

$$|H(v_x, v_y)| = M(v_x, v_y).$$

Передавальна функція є нормованим двовимірним перетворенням Фур'є від функції розсіювання точки і характеризує поведінку оптично-електронної системи в області просторових частот та визначається залишковим контрастом зображення синусоїдальної міри одиничного контрасту.

Поняття передавальної функції, а отже і МПФ можна застосовувати лише для інваріантних систем. Тепловізор є системою у складі тепловізійної камери та

монітору. При невеликих температурних контрастах і невеликих полях зору ця система може вважатись інваріантною і її МПФ визначається добутком

$$M(\nu_x, \nu_y) = M_k(\nu_x, \nu_y) \cdot M_m(\nu_x, \nu_y), \quad (4.1)$$

де $M_k(\nu_x, \nu_y)$ - МПФ тепловізійної камери; $M_m(\nu_x, \nu_y)$ - МПФ монітору.

Експериментальні та теоретичні дослідження свідчать про те, що МПФ більшості тепловізорів визначаються насамперед МПФ тепловізійної камери:

$$M(\nu_x, \nu_y) \approx M_k(\nu_x, \nu_y).$$

Вимірювання МПФ

Для вимірювання МПФ можна використовувати як прямі, так і непрямі методи. Серед непрямих методів вимірювань найбільш розповсюдженим є обчислення МПФ як просторового Фур'є-спектру від функції розсіювання лінії.

Прямі методи полягають в вимірюванні рівня сигналу від періодичного тест-об'єкту з синусоїдальним розподілом енергетичної яскравості вздовж однієї координати (рис.1, а). Практична реалізація таких вимірювань в інфрачервоному діапазоні спектру з достатньою точністю наразі є дуже проблематичною внаслідок складності виготовлення синусоїдальних тест-об'єктів різної просторової частоти. Тому в вимірювальних стендах для тепловізійної апаратури часто використовуються скінченні штрихові періодичні тест-об'єкти (рис. 4.1, б).

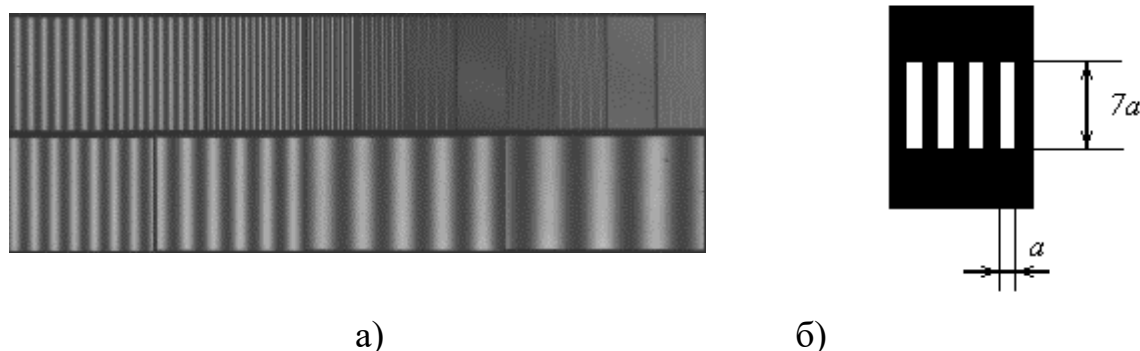


Рис. 4.1. Штрихова тест-міра для вимірювання МПФ: а) синусоїдальний тест-об'єкт; б) штрихова тест-міра

В цьому випадку для розрахунків фактичних МПФ необхідно враховувати, по-перше, просторову обмеженість тестових мір, по-друге, відмінність розподілу вхідного сигналу від гармонійного.

Для того, щоб досліджувана оптично-електронна система реагувала на реальний тест-об'єкт як на нескінченно-протяжний, ширина зображення кожного штриха міри певної просторової частоти, повинна істотно перевищувати ширину функції розсіювання досліджуваної системи (інакше не вдасться точно виміряти

найбільший і найменший сигнали при скануванні вздовж вибраного напрямку). Як показують розрахунки, в ідеальному випадку з безабераційним об'єктивом результат вимірювання МПФ перестає залежати від числа n періодів міри вже при $n = 7$, а при $n = 5$ похибка у визначенні МПФ не перевищує 1%.

В разі заміни об'єкту з синусоїдальним розподілом енергетичної яскравості на штрихову тест-міру, вхідний сигнал є сумою елементарних синусоїд з частотами, кратними $2n + 1$, де n - номер гармоніки. Для розрахунку МПФ по штриховому тест-об'єкту необхідно виділити першу гармоніку у вимірюваному сигналі. Основними методами виділення потрібної гармоніки з сумарного сигналу є фільтрація за допомогою електричного фільтру, оптична фільтрація з використанням перетворення Фур'є, перерахунок контрасту зображення штрихової міри в контраст зображення синусоїдальної міри по формулі Колтмена (виключно для осьової точки об'єкту) [4].

У даній роботі використовується останній спосіб. Формула Колтмена дає можливість визначити контраст в зображенні синусоїдальної міри по контрасту в зображенні штрихової міри і навпаки. За кордоном просторово-частотну залежність передачі контрасту в зображенні штрихової міри називають функцією передачі контрасту (Contrast Transfer Function, CTF). Залежність МПФ від CTF для деякої частоти ν має вигляд:

$$M(\nu) = K_c(\nu) = \frac{\pi}{4} \left[K_n(\nu) + \frac{K_n(3\nu)}{3} - \frac{K_n(5\nu)}{5} + \frac{K_n(7\nu)}{7} + \frac{K_n(11\nu)}{11} - \frac{K_n(13\nu)}{13} - \frac{K_n(15\nu)}{15} - \frac{K_n(17\nu)}{17} + \frac{K_n(19\nu)}{19} \dots \right], \quad (4.2)$$

де $K_c(\nu)$ - контраст зображення синусоїдальної міри з частотою ν ;

$K_n(\nu)$ - контраст зображення прямокутної міри з частотою ν ;

а обернена залежність має вигляд:

$$K_n(\nu) = \frac{4}{\pi} \left[M(\nu) - \frac{M(3\nu)}{3} + \frac{M(5\nu)}{5} - \frac{M(7\nu)}{7} + \frac{M(9\nu)}{9} - \frac{M(11\nu)}{11} + \dots \right]. \quad (4.3)$$

Із наведених формул (4.2), (4.3) видно, що перша залежність, на відміну від другої є нерегулярною. Таким чином, використання формули Колтмена збільшує об'єм вимірювань внаслідок необхідності визначати контраст по прямокутній мірі для кількох додаткових значень частот, крім заданих. Наприклад, якщо смуга частот, які пропускає система обмежена значенням 130 мм^{-1} , то для обчислення МПФ на частоті $\nu = 10 \text{ мм}^{-1}$, необхідно визначити CTF на 6-ти просторових частотах - $\nu = 10 \text{ мм}^{-1}$, 30 мм^{-1} , 50 мм^{-1} , 70 мм^{-1} , 110 мм^{-1} , 130 мм^{-1} :

$$M(10) = \frac{\pi}{4} \left[K_n(10) + \frac{K_n(3 \cdot 10)}{3} - \frac{K_n(5 \cdot 10)}{5} + \frac{K_n(7 \cdot 10)}{7} + \frac{K_n(11 \cdot 10)}{11} - \frac{K_n(13 \cdot 10)}{13} \right]$$

Зазвичай можна обмежитися першими трьома або чотирма членами формули, оскільки наступні члени мають невеликі значення. Для першої гармоніки модульованого сигналу формули (4.2), (4.3) спрощуються:

$$M(\nu) = \frac{\pi}{4} \cdot K_n(\nu), \quad K_n(\nu) = \frac{4}{\pi} \cdot K_c(\nu).$$

Величина STF $K_n(\nu)$ для поточної просторової частоти ν є відношенням контрасту зображення прямокутною міри цієї частоти до контрасту самої міри. В разі використання міри одиничного контрасту STF дорівнює контрасту зображення міри і обчислюється за формулою

$$K_n = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}, \quad (4.4)$$

де $L_{\max}, L_{\min}$ - максимальна і мінімальна яскравість зображення тест-об'єкту відповідно.

Для визначення МПФ тепловізійної камери, на виході якої немає зображення, величини $L_{\max}, L_{\min}$ потрібно замінити на відповідні максимальну і мінімальну амплітуди $I_{\max}, I_{\min}$ відеосигналу в рядку телевізійної розгортки (рис. 4.2).

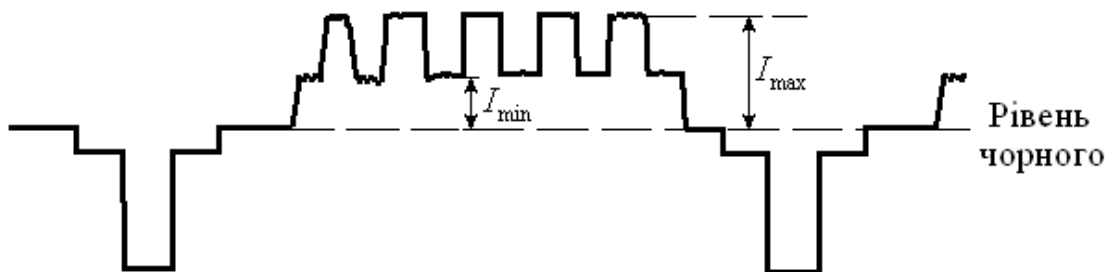


Рис. 4.2. Вимірювання сигналів в рядку для визначення STF

Схема лабораторної установки

Лабораторна установка складається з імітатора теплових полів, тепловізора та осцилографа С1-81.

Імітатор теплових полів призначений для встановлення та підтримання необхідного температурного контрасту на тест-об'єкті заданої просторової частоти. Він складається з тест-об'єкта 1 (рис. 4.3) і джерела фонового випромінювання 2. Управління температурою джерела фонового випромінювання 2 здійснюється електричним нагрівачем і контролюється з допомогою термометра 3.

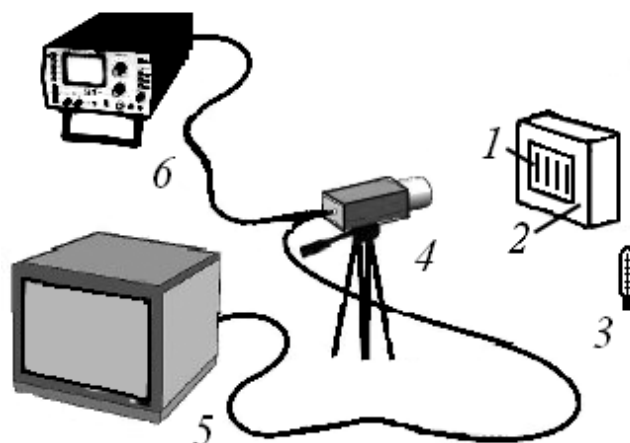


Рис. 4.3. Схема лабораторної установки для вимірювання МПФ: 1 - тест-об'єкт; 2 - джерело фонового випромінювання; 3 – термометр; 4 - тепловізійна камера; 5 – ВКП; 6 - осцилограф

Тепловізійна камера 4 Thermal Eye TSC має матричний приймач випромінювання 160x120 пікселів розміром 30x30 мкм² кожний і обладнана об'єктивом з фокусною відстанню 16 мм, що забезпечує кутове поле зору 17°x12°. Вихід тепловізійної камери 4 може підключатись до відеоконтрольного пристрою 5 (або будь-якого монітору з відповідним інтерфейсом) та до осциллографу з виділенням рядка С1-81.

Відстань між тест-об'єктом 1 і тепловізійною камерою 4 становить близько 3,8 м.

Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи

В ході виконання лабораторної роботи використовуються прилади, що підключені до електричної мережі. Виконавцям роботи необхідно дотримуватись правил безпеки, що викладені в додатку 1 до методичних вказівок.

Порядок виконання роботи

Вимірювання в даній роботі виконуються тільки для горизонтально орієнтованої тест-міри починаючи з мір з найменшою просторовою частотою штрихів.

1. За методичними вказівками, конспектом лекцій, відповідно до літератури з'ясувати мету та зміст роботи, ознайомитись із схемою (рис. 4.3). Вивчити правила роботи з осциллографом за додатком 2.

2. Ввімкнути тепловізійну камеру, відеоконтрольний пристрій та осцилограф.

3. З набору штрихових мір перед джерелом фонового випромінювання (кюветою з водою) встановлюється міра з найменшою просторовою частотою. Міру, температура якої вважається рівній температурі оточуючого середовища, розташувати на відстані ≈ 50 мм від фонового випромінювача в центрі поля зору тепловізійної камери.

4. За допомогою електроводонагрівача температура фонового випромінювача доводиться до величини, що на ΔT_1 (задається викладачем) є меншою, ніж температура об'єкту. Температура контролюється термометром. Рівномірність температури по полю зору необхідно забезпечити перемішуванням води в кюветі.

5. З допомогою осциллографа визначити максимальну і мінімальну амплітуди $I_{\max}, I_{\min}$ відеосигналу від штриха міри в рядку телевізійної розгортки (рис. 4.2) і занести ці дані в табл. 4.1. В ході вимірювань необхідно запобігати потраплянню в поле зору тепловізійної камери сторонніх нагрітих предметів та людей. Вимірювання виконувати в центральній частині штрихової міри.

6. Змінити штрихову міру на більш високочастотну і повторити п.5 для всього набору мір.

7. За допомогою електроводонагрівача температуру фонового випромінювача довести до величини, що на ΔT_2 (задається викладачем) є меншою, ніж температура об'єкту.

8. Повторити пп.5, 6.

9. Після закінчення вимірювань розрахувати для кожної міри її частоту у кутових одиницях в занести дані до табл. 4.1. Просторова кутова частота ν_{xi} кожної міри розраховується виходячи з фокусної відстані об'єктива тепловізійної камери і відстані до об'єкта. За необхідності виміряти рулеткою чи лінійкою відстань між тепловізійною камерою і тест-об'єктом.

10. За значеннями $I_{\max}, I_{\min}$ для кожної міри з частотою ν_{xi} розрахувати контрасти $K_n(\nu_{xi})$ і занести ці дані в табл. 4.1.

11. Для кожної міри частотою ν підібрати частоти в 3 та в 5 разів більші та вирахувати контрасти $\frac{K_n(3\nu)}{3}$ і $\frac{K_n(5\nu)}{5}$, занести дані до табл. 4.1.

12. За формулою (4.2) розрахувати значення МПФ $M(\nu)$ на всіх частотах. В разі відсутності більш високочастотних доданків враховувати ті, що є.

13. По отриманих даних побудувати графіки МПФ для температурного контрасту ΔT_1 , ΔT_2 .

Таблиця 4.1

Результати вимірювань модуляційної передавальної функції

№ міри	ν_{xi} , мрад ⁻¹	$\Delta T_1 =$ °C						$\Delta T_2 =$ °C					
1													
2													
3													
...													

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Схему макету.
2. Заповнену таблицю вимірювань.
3. Графіки МПФ для температурного контрасту ΔT_1 , ΔT_2 .
4. Висновки.

Контрольні питання

1. МПФ та її зв'язок з іншими характеристиками оптично-електронного приладу.
2. Способи вимірювання МПФ.
3. Похибки, що виникають при вимірюванні МПФ з допомогою мір Фуко.
4. Формула Колтмена.

Лабораторна робота №5

ТЕРМОГРАФІЯ В МЕДИЦИНІ

Мета роботи:

1. Закріплення та поглиблення знань про застосування термографії у медицині.
2. Вивчення конструкції та принципу роботи термографа ТВ-03.
3. Набуття вмінь та навичок у практичному використанні термографа ТВ-03.
4. Оволодіння навичками розшифровки термограм.

Завдання

1. Вивчити теоретичні положення про фізіологічні основи термографії та використання термографічних приладів у медичній діагностиці.
2. Дослідити оптичну та функціональну схеми термографа ТВ-03.
3. Ознайомитись з принципом роботи термографа ТВ-03.
4. Отримати термограму руки на електрохімічному папері (ЕХП).
5. Провести аналіз та обробку термограм.
6. Визначити температурний градієнт та обчислити його коефіцієнти. Визначити термографічний індекс (T_u).
7. Визначити температуру окремої ділянки термозображення.

Прилади та обладнання

Термограф ТВ-03.

Основні положення

Фізіологічні основи термографії

Відомо, що організм людини можна розглядати, як відкриту термодинамічну систему, що поглинає енергію з навколишнього середовища й випромінює тепло. При цьому в середині цієї системи здійснюється перетворення різних видів енергії, що призводить до виділення теплової енергії.

Первинним джерелом енергії в організмі для проведення усіх видів робіт є хімічна енергія харчових продуктів, що виділяється при їхньому окислюванні. У результаті протікання незворотних біохімічних реакцій і біофізичних процесів в організмі виділяється тепла енергія.

Тепловипромінювання людського тіла описується законом Стефана-Больцмана, згідно якого інтегральна енергетична світимість

$$W = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4,$$

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

Таким чином, теплове випромінювання тіла насамперед пов'язано з температурою його шкіри, що може змінюватись у широких межах у результаті фізичного, розумового навантаження й інших факторів. При нормальних умовах температура шкіри не нижче температури внутрішніх органів тіла і знаходиться в межах від 30,5° С до 35,5° С. Оскільки шкіра є покровом, що відокремлює внутрішні органи від навколишнього середовища, її температура повинна змінюватись в залежності від тих процесів, що відбуваються як усередині організму, так і на зовні. Коливання температури шкіри залежать від багатьох факторів: судинні реакції, швидкість кровотока, наявність локальних чи загальних джерел тепла всередині тіла, регуляції теплообміну одягом, випаровування, конвекція. Різні патологічні стани можуть впливати як на розподіл, так і на інтенсивність теплового випромінювання, що може мати відоме діагностичне і прогностичне значення. Про це свідчать численні клінічні дослідження.

До основних законів термографії відносяться закон Стефана-Больцмана та закон Віна. Тіло людини майже завжди тепліше температури навколишнього середовища і є джерелом ІЧ-випромінювання. Відповідно до закону Віна, максимум довжини хвилі випромінювання людини (якщо прийняти температуру шкіри 30°С) дорівнює 9,6 мкм.

Термографічний метод медичної діагностики

В основі термографічного методу медичної діагностики лежить безконтактна дистанційна реєстрація ІЧ-випромінювання шкірних покривів людини за допомогою спеціальної апаратури. Результатом реєстрації є термограма, що представляє собою двовимірну картину розподілу температури на поверхні тіла. Аналіз картини дозволяє дати якісну оцінку характеру зображення і кількісних критеріїв температурних градієнтів.

Термограма дозволяє ефективно виявити паталогічні процеси, що супроводжуються посиленою теплопродукцією тканин і органів, посиленням локального кровообігу і зміною моторних реакцій серцево-судинної системи. В даний час термографія знаходить широке застосування в онкології, кардіології, імунології, гемогіалогії, нефрології, дитячій ортопедії, реконструктивній хірургії.

Великий інтерес вчених-медиків до термодіагностики викликаний її абсолютною нешкідливістю, високою швидкістю дослідження і підвищеною

точністю (мінімально реєструємий градієнт температур двох точок на відстані 1 мм складає $0,05^{\circ}\text{C}$). Також цей метод забезпечує можливість одночасної оцінки функціонального стану великого числа різних систем організму при оглядовій термографії.

Термографічні прилади, що застосовуються для діагностики

Медична діагностика за ІЧ випромінюванням має особливості, які обумовлені насамперед функціонуванням в лабораторних умовах і відносно малими вхідними температурними контрастами. Тому до цього часу на практиці використовуються досить великогабаритні термографи з оптико-механічним скануванням. Основними елементами таких термографів є високочутливий приймач ІЧ випромінювання та двохкоординатна система сканування. ІЧ приймач випромінювання розташовується в площині зображень об'єктива і реєструє енергію, що випромінюється елементом нагрітого тіла в межах малого тілесного кута, який називається миттєвим полем зору. Послідовний аналіз усього поля зору здійснюється за допомогою дзеркал, призм або клинів.

Опис термографа ТВ-03(«Факел»)

Термограф ТВ-03 працює у реальному масштабі часу та застосовуються для спостереження і реєстрації нестационарних теплових полів. Прилад складається з двох окремих блоків: камери і ВКП. Реєстрація візуального зображення здійснюється шляхом фотографування з екрану електро-променевої трубки ВКП.

Функціональна схема тепловізора ТВ-03 і його оптична схема представлені на рис. 5.1, 5.2.

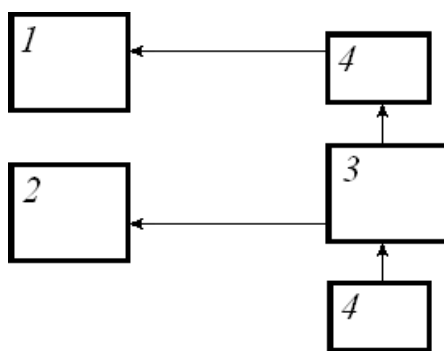


Рис. 5.1. Функціональна схема тепловізора ТВ-03: 1 - голівка оптична; 2 - блок електрохімічного запису; 3 - блок електронний; 4 - два блоки живлення

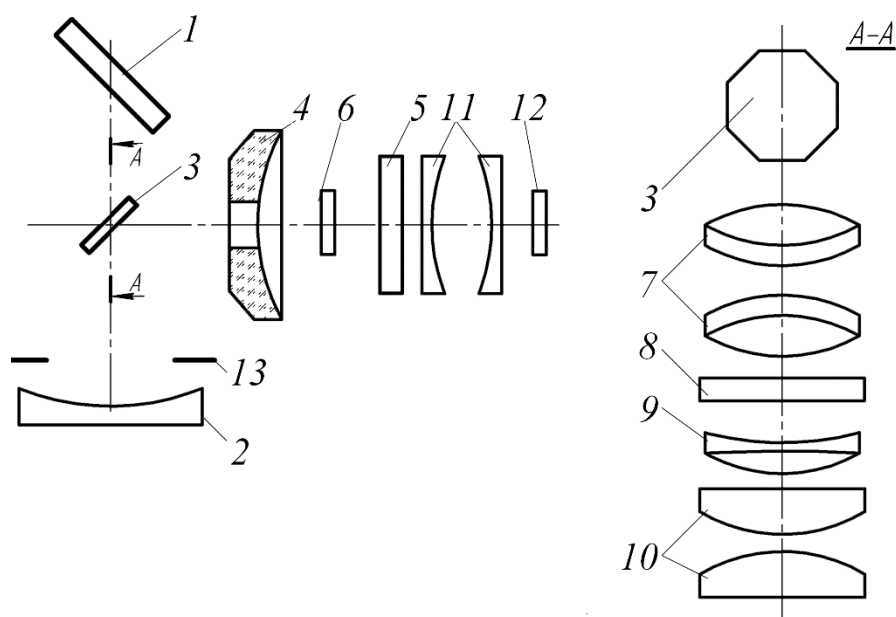


Рис. 5.2. Оптична схема тепловізора ТВ-03: 1 – скануюче дзеркало; 2 – сферичне дзеркало; 3 – напівпрозора пластинка; 4 – сферичне дзеркало дзеркального об'єктиву; 5 – плоске контр-дзеркало дзеркального об'єктиву; 6 – діафрагма-переривач; 7 – колективні лінзи окуляра; 8 – сітка окуляра; 9 – обертаюча лінза окуляра; 10 – очні лінзи окуляра; 11 – протиблискові лінзи; 12 – приймач випромінювання; 13 – вхідна зіниця

Основні характеристики тепловізора подані в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Технічні дані тепловізора ТВ-03

Поріг чутливості до перепаду температур на рівні 30°C, не менше	0,1
Роздільна здатність, кут. хв, не більше	6
Межа фокусування, м	0,4
Поле огляду, кут.град., не менше	(20x1)x(20x1)
Число рядків у кадрі, не менше	220
Формат термограми, мм	90x90
Час запису кадру, с	45x2
Діапазон вимірюваних температур, °C	18 - 200
Час роботи після заливання азоту, хв	90

Розшифровка термограм

Правильна розшифровка термограм має найважливіше значення для об'єктивного рішення конкретних задач дослідження. Медична термографія з моменту свого виникнення ґрунтується на візуальній оцінці шляхом порівняння

термограм симетричних ділянок тіла між собою та з еталонним ІЧ-джерелом. Це джерело застосовується для визначення абсолютної температури досліджуваної області і градієнта температур на двох суміжних чи симетричних ділянках тіла.

Аналіз і обробка термограм виконується за наступними термографічними ознаками:

1. Виявлення термоасиметрії.
2. Вивчення площі асиметричної ділянки (зони гіпо- чи гіпертермії), розмірів, ступеня однорідності, характеру границь і т.ін.
3. Визначення температурного градієнта й обчислення його коефіцієнта, який дорівнює відношенню температури між точками до відстані між ними.
4. Визначення максимальної, мінімальної і середньої абсолютної температури симетричних ділянок.
5. Визначення термографічного індексу (TI), що дорівнює відношенню суми температур, що відповідають кожному ізотермічному полю, до загальної площі зони паталогічної термоасиметрії:

$$TI = \varepsilon \frac{\Delta T \cdot a}{A},$$

де ε – сума температур, що відповідають кожному температурному полю; ΔT° - різниця температур кожного температурного градієнта і стандарту, що відповідає середній температурі даної ділянки поверхні тіла людини (див. табл. 5.2); a - виявлена температура кожного градієнта; A - загальна площа зони паталогічної термоасиметрії.

У нормі TI лежить у межах від 4,62 до 4,94 і в середньому складає 4,87.

Таблиця 5.2

Розподіл температур по поверхні тіла людини

Область тіла	Середні значення температури, °C
Обличчя і шия	32,1 - 33,4
Область грудей	32,4 - 33,0
Область живота	33,1 - 33,7
Спина і хребетний стовп	33,5 - 34,2
Верхні кінцівки (крім пальців)	31,2 - 32,6
Пальці рук	27,2 - 28,6
Нижні кінцівки (крім стіп)	32,1 - 32,4
Пальці ніг	23,3 - 23,9

Підготовка приладу до роботи

Перед ввімкненням приладу «ТВ-03» у мережу живлення необхідно виконати наступні операції:

- установити ручку керування на електронному блоці у вихідне положення, тумблер «Сеть» - у положення «Выкл»;
- ручку режиму робіт – у положення «Радиометр»;
- ручку «Изотерма» - у крайнє ліве положення і натиснути кнопку «Сброс»;
- на оптичній голівці ручку керування об'єктивом поставити в положення «Рамка»;
- ручка діаграми повинна бути у відкритому стані;
- положення інших ручок – довільне;
- заправити рідким азотом приймач ІЧ-випромінювання за допомогою пристосування заливку азоту;
- заправити ЕХ-папір у блок ЕХП, кришку блоку залишити відкритою;
- включити тумблер «Сеть»;
- поставити перемикач входів осцилографа в положення 1 «Сигнал»;
- дати прогрітись приладу на протязі 10 хвилин, після чого прилад готовий до роботи.

Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи

В ході виконання лабораторної роботи використовуються прилади, що підключені до електричної мережі. Виконавцям роботи необхідно дотримуватись правил безпеки, що викладені в додатку 1 до методичних вказівок.

Порядок виконання роботи

Термографування без термопрофілю й ізотерм

1. Навести оптичну голівку за допомогою візира на погоджений з викладачем об'єкт. При цьому границі рамки, що проглядаються у візирному пристрої, визначають границі зображення, а миттєве поле зору збігається з перехрестям в центрі кадру на досліджуваній об'єкт. Після встановлення ручки керування об'єктивом оптичної голівки в положення «Фокус», за допомогою ручки наведення на різкість одержати різке зображення об'єкта. Після цього ручку керування об'єктивом необхідно встановити в положення «Кадр».

2. Перемикачами «Диапазон» на електричному блоці виставити значення очікуваного діапазону температур.

3. Перемикачами «Уровень» і «Диапазон» за допомогою індикатора уточнити значення і перепад температур, при суміщенні положення горизонтальної лінії індикатора із серединою екрана.

4. Переключити ручку роду робіт у положення «Кадр». Через 30 секунд, необхідних для встановлення коливань дзеркала, протягнути вручну суху ділянку ЕХ-паперу, закрити кришку ЕХП після ввімкнення лампочки «Кадр». При цьому буде відбуватися запис зображення.

5. Наприкінці кадру у виді цифрової інформації записується положення перемикачів «Уровень» і «Диапазон», а також номер кадру для зручності розшифровки.

6. Визначити температуру окремої ділянки теплового зображення. Для цього зробити порівняльну оцінку густини почорніння по напівтоновій шкалі, що розбивається умовно на 10 рівних відрізків. При цьому враховувати, що перепад густин від чорного до білого відповідає діапазону температур, записаному у виді цифрової інформації. Тобто, на одну градацію густини приходить десята частина діапазону. Виходячи з цього температура ділянки визначається за формулою:

$$T_y = T_{cp} \cdot n \cdot \frac{T_{\Delta}}{10}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

де T_{cp} – рівень відліку температур; n - умовний номер градації на напівтоновій шкалі, густина якої збігається з порівнюваною ділянкою зображення; T_{Δ} - діапазон температур; знак «+» відповідає значенню $n > 5$, а «-» - значенню $n \leq 5$.

Одержання термограми з ізотермічними кривими

Для цього перемикач «Уровень изотермы» встановити на необхідне значення шкали. У цьому випадку температура ізотермічних ліній на зображенні визначається за формулою:

$$T_u = T_{cp} \cdot k \cdot T_{\Delta}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

де k – значення встановленого рівня ізотерми з урахуванням його знака.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Схему макету.
2. Дві термограми вибраного об'єкта – звичайну та з ізотермічними кривими.

3. Розрахунок температури окремої ділянки теплового зображення.
4. Висновки.

Контрольні питання

1. Що таке термографічна діагностика?
2. Які основні закони термографії ви знаєте?
3. Назвіть види відомих вам термографів.
4. У яких областях медицини застосовуються термографи.
5. Призначення, особливості та конструкція термографа ТВ-03.
6. Що таке термограма і які види термограм ви знаєте.
7. Принцип роботи термографа ТВ-03.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. ДСТУ 3807-98. Телебачення. Терміни та визначення.
2. ДСТУ 3837-99. Телебачення мовне. Системи аналогового телебачення звичайної чіткості. Основні параметри та методи вимірювань.
3. Колобродов В.Г., Шустер Н. Тепловізійні системи. – К.: Тираж, 2001. – 340 с.
4. Krzysztof Chrzanowski Testing Thermal Imagers: Practical Guidebook. – Warsaw: Military University of Technology, 2010. - 164 pp.
5. Thomas Williams Thermal Imaging Cameras: Characteristics and Performance. – CRC Press, 2009. – 238 pp.
6. Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Балінський Є.Г. Ефективність інфрачервоних оптико-електронних систем спостереження: монографія. Київ: Вік принт, 2017. – 202 с.
7. Ronald G. Driggers, ect. Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems. Second Edition. – Artech House, 2012. – 583 pp.
8. Колобродов В.Г., Микитенко В.І. Комплексування інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження: монографія. Поліграфічний центр «Аверс».- Київ, 2013. – 178 с.
9. Coltman J.W. The specification of imaging properties by response to a sine-wave input. - J. Opt. Soc. America, 1954, v.44, №6.
10. Добровольська К.В., Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Тягур В.М. Підвищення просторової роздільної здатності космічних мікроболометричних камер: монографія. Київ: Вік принт, 2018. – 223 с.
11. Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження: Підручник. – К.: Політехніка, 2007. – 360 с.
12. Розроблення та контроль автоматизованих оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі: монографія / В.Г. Колобродов, І.В. Кравченко, В.І. Микитенко. – Київ: Інтерсервіс, 2021. – 170 с.
13. Gerald C. Holst Common Sense Approach to Thermal Imaging. – SPIE Optical Engineering Press, 2000. 370 p.

Інструкція з електробезпеки при виконанні лабораторних робіт

1. Електричний струм небезпечний тим, що його дія на організм людини може викликати порушення серцевої діяльності, зупинку дихання, шоківий стан, опіки, а нерідко закінчується смертю. Внаслідок цього користування приладами, що живляться електричним струмом, вимагає особливої уваги та обережності від людини.

2. При ураженні електричним струмом розрізняють: електричні удари, коли струмом уражається весь організм, і електротравми, коли отримують місцеві зовнішні та внутрішні ураження тіла – опіки. При електричному ударі, коли струм проходить через тіло людини, у більшості випадків спочатку порушується дихання, а серце продовжує працювати з порушенням свого ритму, після чого може статися його зупинка, а потім і смерть.

Електричні опіки тіла можуть бути отримані, як при проходженні електричного струму через тіло людини, так і від іскор вольтової дуги при різноманітних умовах короткого замикання, наприклад при зміні зіпсованих електрозапобіжників, при випадковому замиканні різних електричних фаз металевими предметами або несправної ізоляції живлячих дротів та інші. При цьому опік може виявлятися почервонінням шкіри та утворенні на ній пухирів, а іноді - викликати глибоке порушення тканин і навіть обвуглення кісток.

3. Для уникнення ураження електричним струмом при користуванні електроприладами під час виконання лабораторної роботи слід дотримуватися правил:

- не вмикати в електромережу електроприлади, шнури живлення яких мають пошкоджену ізоляцію;
- не вмикати в електромережу електроприлади, які мають пошкоджені або ненадійно з'єднані з електродротом живлення, вилками, розетками та подовжувачами;
- не користуватися пошкодженими розетками, відголужувальними та з'єднувальними коробками, вимикачами та іншою електроарматурою, а також електролампами, скло яких має сліди затемнення або випинання;
- не користуватися саморобними подовжувачами, які не відповідають вимогам ПУЕ, що пред'являються до переносних електропроводок;
- при можливості уникати доторкання руками до металевих частин електроприладів, увімкнених в електромережу;

- не доторкатися руками до обірваних та оголених дротів електромережі, електроприладів;
- не замінювати самостійно зіпсовані електрозапобіжники, електролампи, не проводити ремонт електроприладів, електромережі;
- не залишати без догляду працюючі електроприлади;
- по закінченні роботи вимкнути вимикач на електроприладі та від'єднати дріт живлення від розетки електромережі. При цьому слід пам'ятати, що від'єднуючи вилку електроспоживача від розетки її слід тримати за корпус, а не смикати за дріт живлення, бо можна висмикнути один з дротів і потрапити під дію електричного струму.

4. При ураженні електричним струмом слід негайно звільнити потерпілого від його дії шляхом вимкнення електричного струму або відривання його від джерела струму тримаючись за одяг потерпілого, якщо він сухий, чи ставши на гумову ковдру, суху дошку, картон, фанеру, брезент.

5. Якщо потерпілий опинився в стані непритомності, слід забезпечити йому приплив свіжого повітря, розстібнути тісний одяг, дати нюхати нашатирний спирт, обприскати водою, розтирати і зігрівати тіло. Негайно викликати швидку медичну допомогу.

6. При рідкому та судорожному вдиханні потерпілого, слід робити йому штучне дихання. Допомогу потерпілому повинні надавати дві особи:

- одна з них накладає долоню на нижню третину грудей і створює поштовхи на груди з частковою приблизно 50-ти поштовхів на хвилину;
- друга надає допомогу, щільно притуливши свої губи до роту потерпілого і дмуває в його легені повітря. Надавати цю допомогу потерпілому продовжувати до прибуття кваліфікованої медичної допомоги. При отриманні потерпілим опіків, не торкатися руками обпечених місць, обережно накласти на пошкоджені місця стерильну пов'язку і відвести потерпілого до медичного закладу

Додаток 2

Короткий опис роботи з універсальним осцилографом С1-81

Перед початком роботи та ввімкненням осцилографа встановити органи керування в наступні положення:

- перемикач «Фильтры МНЗ» (мала ручка) в положення «откл.», а перемикач входів (велика ручка) в положення ;
- мала ручка подвоєного потенціометра «А сеть» у положення «откл.», велика ручка цього ж потенціометра  у крайнє ліве положення;

- ручки «» та «» у середнє положення (ручки знизу екрану, друга справа);

- мала ручка подвоєного потенціометра «» у положення «откл.» (у крайнє ліве положення до клацання, а велика у середнє);

- перемикач синхронізації (велика ручка справа від екрану, зліва від надпису «блок синхронизации») в положення «Внутр. Авт.»;

- кнопки «(R-V)-БВС» у віджатому стані.

Для ввімкнення осцилографа повернути малу ручку потенціометра (ручка  розташована знизу екрану, друга зліва) в середнє положення.

Дати прогрітисся приладу 4-5 хв.

Встановити перемикач «время/см» блоку розгортки (правий верхній кут осцилографа): велику у положення $5\mu s$, малу ручку у крайнє праве положення. Кнопку «множитель» у положення «x1» (віджата).

Малою  та великою  ручкою подвоєного потенціометру, що призначений для регулювання астигматизму та фокусу, досягти фокусування лінії променя. Малою ручкою  (друга зліва, під екраном) досягти, щоб розгортка була не дуже яскравою, але щоб її було добре видно. Ручкою  встановити яскравість підсвітки шкали для створення більш приємного для очей світіння екрану.

Якщо лінію розгортки не буде видно на екрані при максимальній яскравості, то перемістити її за допомогою ручок «», «» («» ручка розташована справа над екраном: велика регулює зміщення по горизонталі плавно, мала - грубо; «» ручка розташована зліва над екраном: велика регулює зміщення по вертикалі плавно, мала - грубо).

Ручками «» та «» відцентрувати лінію розгортки. Ручку V/см блоку «Усилитель Y» встановити: малу - в крайнє ліве положення, велику - у положення 0,5 V/см.

Після подачі сигналу з камери на вхід , для роботи в режимі виділення рядка встановити ручку в режим синхронізації (велика ручка блоку синхронізації) в положення «відео БВС II/I», важіль, що знаходиться зліва внизу – в положення +, та ввімкнути блок БВС (блок виділення рядка) натисканням кнопки БВС-(R-V). Вибір рядка здійснюється обертанням ручки «»; грубий вибір – малою ручкою, плавний вибір – великою ручкою. Вибір поля здійснюється важелем, розташованим зліва від потенціометра «Выбор строки».

Для зручності спостереження відеосигналу досягти обертанням великої ручки потенціометру «задержка» (у правому нижньому куті осцилографа, в блоці синхронізації) розташування відеосигналу по центру екрана, а малою ручкою

«Развертка время/см» досягти того, щоб зображення одного рядка займало весь екран (це досягається, коли фронти гасних імпульсів розташовані по краях екрану).

Ручкою « ⌕ » досягти, щоб зображення відеосигналу знаходилося у зручній для спостереження частині екрану.

Перед вимкненням осцилографа ручки встановіть у вихідне положення та вимкніть осцилограф обертанням малої ручки проти годинникової стрілки.

Додаток 3

Короткий опис роботи з люксометром Ю 116

Люксометр складається з блока вимірювання та селенового фотоелемента в корпусі, які з'єднані між собою електричним кабелем. В блоці вимірювання використовується магнітоелектричний стрілочний індикатор з двома шкалами: від 0 лк до 30 лк і від 0 лк до 100 лк. На кожній шкалі крапками позначені початки діапазонів вимірювань (відповідно – 5 лк та 20 лк). Для зменшення косинусної похибки на фотоелемент можна встановити опуклу світлорозсіюючу насадку, яка позначена літерою "К". Ця насадка використовується тільки разом з одним з трьох світлопоглинаючих фільтрів, що позначаються літерами "М", "Р", "Т". Кожен з цих фільтрів разом з насадкою "К" забезпечує коефіцієнт ослаблення випромінювання:

- КМ – 10;
- КР – 100;
- КТ – 1000.

Переключення між шкалами (діапазонами) вимірювань здійснюються з допомогою двох кнопок. Для визначення освітленості показання приладу на відповідній шкалі помножаються на коефіцієнт ослаблення встановлених фільтрів. Наприклад, якщо на фотоелементі встановлені фільтри КМ, на блоці вимірювання натиснуто ліву кнопку, а показання по шкалі "0-30" дорівнюють 15 поділок, то освітленість становить $15 \times 10 = 150$ лк. Якщо при встановлених фільтрах КМ та діапазоні вимірювання (0 – 30) лк стрілка не доходить до поділки "5" шкали "0-30", то вимірювання необхідно виконувати без фільтрів.

Після закінчення вимірювань необхідно від'єднати фотоелемент від блока вимірювання, установити фільтр "Т" та закріпити фотоелемент в кришці футляра.

Короткий опис роботи з фотометром ФП-4

Фотометр складається з двох блоків – оптичної головки та вимірювального приладу. Оптична головка складається з об'єктиву, набору змінних діафрагм, фотоелектричного помножувача (ФЕП) та візирної системи. Візирна система дозволяє контролювати зображення у фокальній площині об'єктиву та положення діафрагми відносно цього зображення. Величина сигналу ФЕП визначається за показниками вимірювального блоку.

Ввімкнення фотометру ФП-4 відбувається тумблером “СЕТЬ”, що розташований на вимірювальному блоці.

Увага! Ввімкнення живлення ФП-4 при великій освітленості вхідної зіниці та утоплених кнопок, що розташовані у нижній частині оптичної головки ФП-4, заборонено. Це може привести до виходу з ладу ФП-4.

Юстування установки здійснюється суміщенням діафрагми оптичної головки ФП-4 з площиною зображення об'єктної сцени. Діафрагма спостерігається через візирну систему як чорна точка. На ФЕП потрапляє променистий потік від ділянки зображення, яка перекривається чорною точкою.

При підготовці ФП-4 до вимірювань необхідно встановити перемикач чутливості, що розташований у верхній частині вимірювального блоку, у положення “1000”, а потім встановити на “0” стрілку вимірювального приладу ручкою “Ноль”. Для виконання вимірювань необхідно тиснути на кнопку в нижній частині оптичної головки. Кнопка може бути зафіксована в утопленому положенні поворотом на 90° проти годинникової стрілки. Після натискання на кнопку необхідно впевнитися, що прилад не зашкалює. В іншому випадку слід відпустити кнопку й встановити у освітлювач додаткові світлофільтри (між діафрагмою та об'єктивом).

Навчальне видання

Колобродов Валентин Георгійович
Микитенко Володимир Іванович

ТЕПЛОВІЗІЙНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ