

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут"

На правах рукопису  
УДК: 621.384

Іванова Віта Вікторівна

**СИСТЕМИ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ ПРОКАМЕР**

05.11.07 - оптичні та оптичноелектронні прилади

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук



Київ - 1996

81. 285  
535. 317.2

№. 36402

Дисертацією є рукопис  
Дисертація виконана на  
Національного технічного

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00760656 (U)

Науковий керівник: кап  
пр

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,  
професор В.В.Молебний  
кандидат технічних наук,  
доцент С.О.Воронов

Провідна організація: ЦКБ "АРСЕНАЛ"

Захист відбудеться "15" січня 1997р. о 15 годині  
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.02.14 при  
Національному технічному університеті України "КПІ"  
за адресою: 252056, м.Київ, проспект Перемоги, 37.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці НТУУ "КПІ".

Автореферат розіслано "5" грудня 1996р

Відгуки на автореферат просимо надсилати вченому секретарю  
спеціалізованої ради Д.01.02.14 проф. Л.М.Гельману за адресою:  
252056, м.Київ, проспект Перемоги, 37, корп. 1.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 01.02.14,  
доктор технічних наук,  
професор

Л.М.Гельман

## 1. АНОТАЦІЯ

### 1.1. Мета роботи.

Метою дисертаційної роботи є розробка методики проектування систем модуляції (СМ) для пірокамер (ПК), що забезпечує покращення технічних характеристик і якості зображення ПК.

### 1.2. Задачі, що вирішуються.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються такі задачі:

1. Дослідження особливостей функціонування пірокамери в режимі модуляції і методів модуляції випромінювання для ПК, розробка функціональної схеми ПК.
2. Розробка математичної моделі системи "об'єктив-модулятор-піровідикон".
3. Аналіз впливу СМ на технічні характеристики ПК, вибір критерія ефективності роботи СМ, пошук шляхів поліпшення технічних характеристик ПК, розробка системи вимог до СМ ПК.
4. Дослідження можливості застосування нових типів оптоелектронних модулаторів для ПК.
5. Розробка схемних і конструктивних вирішень СМ.

### 1.3. Положення, що захищаються.

Вирішивши поставлені в дисертаційній роботі задачі, автор вносить на захист:

1. Математичну модель системи "об'єктив-модулятор-піровідикон", що визначає роль модулятора як елемента, що здійснює просторово-частотну обробку зображення на вході ПК.
2. Методику і результати оцінки впливу СМ на технічні характеристики і якість зображення ПК.
3. Методику узгодження параметрів режиму модуляції з задачами спостереження, характеристиками об'єктів спостереження і параметрами ПК.
4. Варіанти конструкції механічних та інших типів модулаторів.
5. Результати досліджень застосування напівпровідникового модулатора інфрачервоного випромінювання в ПК.

## 2.ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

### 2.1.Актуальність роботи.

Тепловізори на базі піровідикона (ПВ), тобто ПК, вже знайшли застосування в багатьох галузях науки і техніки. Найбільш перспективним є їх використання в системах неруйнівного контролю, медицині, оглядово-візирних системах малого радіуса дії військової техніки, в лісовому і сільському господарстві, будівництві, промисловості. Це пояснюється відсутністю систем охолодження та оптично-механічного сканування, телевізійним стандартом формування сигналу, рівномірною чутливістю в широкому спектральному діапазоні роботи ПК, їх малими габаритами і вагою, низькою вартістю, простотою і надійністю будови.

Застосування ПК першого покоління, працюючих в режимі панорамування полем зору, що серійно випускаються в даний час, обмежується рядом вагомих недоліків, пов'язаних з рухом зображення спостережуваних об'єктів на екрані, що зумовлює "змазування" зображення, зменшення чіткості, присутність псевдозображень, погіршення дешифруємості зображень теплових картин.

Застосування в ПК другого покоління модуляторів випромінювання дозволяє усунути згадані недоліки і отримати якісне зображення тепловипромінюючих об'єктів. Проте якість зображення і технічні характеристики ПК, що працюють в режимі модуляції, виявились незадовільними, що пояснювалось енергетичними втратами й додатковими спотвореннями сигналу ПВ, які вносять модулятор. Основні зусилля розробників були спрямовані на поліпшення елементної бази ПК, зокрема, покращення характеристик ПВ, удосконалення конструкції механічного модулятора і переборення технологічних труднощів у створенні малощумного приводу для модулятора, а також розробку електронного блоку спеціальної обробки сигналу.

При цьому практично не були враховані концептуальні причини погіршення якості зображення ПК в режимі модуляції, зумовлені фільтруючими властивостями модулятора, шляхи подолання яких можуть бути знайдені тільки після детального й повного вивчення процесів перетворення сигналу в ПК з системою модуляції (СМ). Під СМ маємо на увазі модулятор випромінювання у сукупності з блоками і вузлами, що забезпечують управління модулятором і виконують зумовлену модуляцією спеціальну обробку сигналу ПВ.

Отже, в даній роботі пропонується новий підхід до проектування СМ, основними рисами якого є:

-розгляд модулятора як елемента, що здійснює просторово-частотну обробку зображення на вході ПК;

-застосування переналаджуваних СМ і змінення параметрів режиму модуляції в залежності від умов і завдань спостереження;

-використання нових для ПК фізичних методів модуляції (оптоелектронних модуляторів інфрачервоного (ІЧ) випромінювання).

Отже, вирішення концептуальних, методологічних, схемо-технічних і конструктивних проблем створення СМ, що покращує технічні характеристики і якість зображення ПК, є нагальною потребою.

## 2.2. Методи дослідження.

Для вирішення поставлених задач автор використовує методи теорії лінійних систем математичного аналізу, методи математичної фізики, теорії оптичних та оптично-електронних систем, теорії теплопровідності, Фур'є-аналізу оптичних систем, комп'ютерного програмування.

## 2.3. Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

а) при розробці математичної моделі ПК з СМ вперше отримано розв'язання рівняння теплопровідності мішені ПВ з граничними умовами, що включають кусочно описувану функцію модуляції; одержано також аналітичні вирази, що описують вихідний сигнал ПВ і модуляційні передавальні функції (МПФ) ПК в різних режимах: модуляції, зокрема, вперше одержані дійсна МПФ для режиму гармонічної модуляції, а також МПФ реальної ПК з урахуванням конструктивної похибки установки модулятора.

б) розроблено методику й проведено аналіз впливу СМ, а саме, режиму модуляції, який визначається законом змінення модульованого потоку випромінювання, параметрів модуляції (частоти, шпарності, зсуву фази), конструкції і конструктивної похибки установки модулятора, на основні характеристики ПК: чутливість, відстань виявлення, порогову різницю температур, мінімальну роздільну різницю температур (МРРТ);

в) запропоновано варіанти технічних вирішень модуляторів, які захищені авторськими свідоцтвами СРСР;

г) дано рекомендації з вибору типу модулятора і режиму модуляції в залежності від умов, завдань і етапів спостереження; розроблено методику підбору оптимальних параметрів модуляції з погляду на мінімізацію МРРТ, в залежності від енергетичних та просторово-частотних характеристик об'єктів спостереження;

д) обгрунтовано можливість і дано рекомендації із застосування напівпровідникового модулятора ІЧ випромінювання в ПК.

## 2.4. Практична цінність роботи полягає в тому, що:

при проектуванні СМ можуть бути використані:

- а) розроблені на основі дослідження ПК з СМ загальні вимоги до СМ;
- б) методика підбору типу модулятора і режиму модуляції в залежності від призначення, умов експлуатації та етапів роботи ПК;
- в) розроблені конструкції механічних модуляторів (шторного, з кулачковим механізмом), що забезпечують підвищення чутливості ПК, волоконно-оптичного модулятора, призначеного для спеціальних умов експлуатації в важкодоступних місцях, а також режими і пристрої модуляції, що покращують візуальне сприйняття зображення;
- д) розрахункові характеристики МРРТ для різних режимів модуляції і СМ;
- е) при експлуатації ПК із СМ може бути використано запропоновану методику підбору параметрів режиму модуляції в залежності від характеристик об'єктів спостереження.

#### 2.5. Апробація роботи.

Головні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Всесоюзному науково-технічному семінарі "Обработка тепловизионных изображений в неразрушающем контроле", м. Москва, 1987р.; IV Всесоюзній конференції "Тепловизионная медицинская аппаратура и практика ее применения - ТЕМП-88", м. Ленінград, 1988р.; 4-й Всесоюзній нараді "Оптические сканирующие устройства и измерительные приборы на их основе", м. Барнаул, 1988р.; Республіканській науково-технічній конференції "Телевизионные методы и средства в науке и технике", м. Ужгород, 1989 р., а також на засіданнях кафедри оптичних приладів КПІ в 1989, 1990, 1996 р.р.

#### 2.6. Публікації.

Список 10 основних робіт, опублікованих за матеріалами дисертації, наведено у кінці автореферату.

#### 2.7. Використання результатів роботи.

Результати роботи використано під час виконання госпдоговірних робіт "Екатериновка-УВО" на п/я Х-5827 у 1986-1989 р.р. і ДКР "Новик-К" в НДІ "Квайт" у 1990-1991 р.р., а також програми Міністерства освіти України "Розробка наукових основ проектування систем теплобачення різного призначення" в 1992-1995 р.р. Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено документами, наведеними в додатку.

#### 2.8. Структура та розмір роботи.

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох глав, висновку, переліку літератури та додатків. Робота містить 136 сторінок основного

тексту, 88 малюнків, 10 таблиць. Загальний об'єм становить 212 сторінок.

### 3. ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі обгрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі роботи, обгрунтовано шляхи їх вирішення, основні положення, винесені на захист, а також коротко схарактеризовано новизну, наукове та практичне значення основних результатів, одержаних в дисертації.

У першій главі описано принцип роботи ПК, дано класифікацію існуючих і перспективних ПК в режимі модуляції, сформульовані основні проблеми, пов'язані з розробкою СМ. Джерелом проблем, пов'язаних з розробкою ПК, є специфічна особливість ПВ, яка полягає в його нечутливості до постійної температури. Тому температурний розподіл на піроелектричній мішені необхідно змінювати в часі. Найперспективнішим методом зміни теплового рельєфу на мішені є модуляція спроектаного об'єктивом на мішень потоку випромінювання.

Згідно із запропонованою функціональною схемою СМ включає модулятор з блоком управління і синхронізації та електронний блок спеціальної обробки сигналу ПВ. Розглянуто основні типи модулаторів для ПК, проаналізовано їхні позитивні якості і вади. В залежності від типу модулюючого елемента модулятор може бути механічним, оптико-електронним. Основними проблемами розробки механічного модулятора є виконання вимоги синхронізації модуляції випромінювання і формування електричного сигналу ПВ, а також запобігання електромагнітним наводкам і тепловому опроміненню мішені та ін.

Застосування оптикоелектронного модулятора дозволяє позбутися ряду недоліків, притаманних механічним модулаторам, таких як наявність рухомих елементів в електромагнітному полі ПВ, вібрації та ін. Аналіз методів модуляції ІЧ випромінювання та базованих на них модулаторів з погляду на можливість їх застосування у ПК, здійснювався за наступними критеріями: спектральний діапазон модуляції (3-5 мкм, 8-14 мкм); швидкодія (час спрацьовування і релаксації  $\leq 20$  мс); коефіцієнт пропускання ( $\geq 0,7$ ); напруга сигналу управління (погоджується з характеристиками ПК); глибина модуляції. Найбільш прийнятними для використання в ПК є методи, основані на ефектах розсіювання в рідких кристалах (РК) і поглинання в напівпровідниках. В порівнянні з поляризаційними, ці методи найбільш ефективні в ІЧ діапазоні, характеризуються значно меншими енергетичними втратами, до 30%, дозволяють отримати глибину модуляції  $m \approx 80-90$  %, не потребують високої електричної напруги,

можуть працювати в променях, що сходяться. Проте РК модулятори не мають достатньої швидкодії. Напівпровідникові модулятори (НПМ) практично безінерційні. Вибрані як найбільш перспективні, НПМ не мають рухомих елементів безпосередньо перед ПВ, не викликають періодичного теплового опромінювання мішені, дозволяють вирішувати задачу синхронізації модуляції і розгортки шляхом задання закону управляючої напруги.

У другій главі обгрунтовано побудування математичної моделі системи "об'єктив - модулятор - ПВ". Розроблена математична модель описує послідовні оптичні, температурні, піроелектричні перетворення та перетворення зчитування, що їх зазнає сигнал у розглядуваній системі. Роль модулятора враховується так званою функцією модуляції, яка описує закон змінення освітленості в даній точці мішені. Розв'язання рівняння теплопровідності з заданими граничними умовами на мішені ПВ при різних законах змінення освітленості зовнішньої поверхні мішені дозволило отримати аналітичні вирази, що описують вихідний сигнал ПВ за різних режимів модуляції. В результаті отримано МПФ ПК в режимах прямокутної, гармонічної модуляції, а також для реальної СМ з урахуванням поздовжнього зміщення встановлення модулятора в площині зображення.

Двомірне рівняння теплопровідності для косинусоїдальної теплової міри з граничними умовами на передній і задній поверхнях мішені :

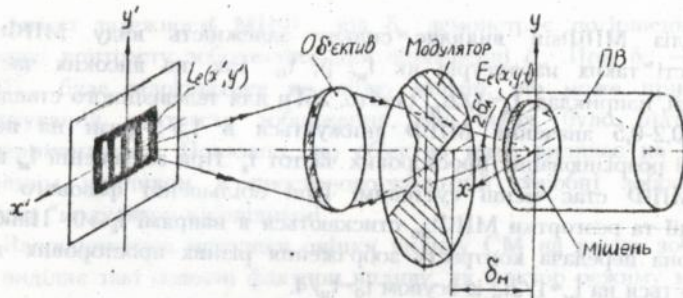
$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$K \frac{\partial T}{\partial z} = \epsilon_f \Delta E \cos(2\pi f_x x) \cdot M(t) - 4\sigma\epsilon_f T_0^3 T; \quad z=b; \quad (2)$$

$$K \frac{\partial T}{\partial z} = 4\sigma\epsilon_b T_0^3; \quad z = 0, \quad (3)$$

де  $\Delta E$  - амплітуда енергетичної освітленості мішені,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $T$  - відносний приріст температури мішені,  $\text{K}$ ;  $K$  - коефіцієнт теплопровідності,  $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{K}$ ;  $D$  - коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\sigma$  - коефіцієнт Стефана-Больцмана,  $\epsilon_f$ ,  $\epsilon_b$  - коефіцієнти випромінювання (поглинання) передньої і задньої поверхонь мішені.

Показано, що гармонічна функція модуляції  $M_{\sin}(t)=e^{i\omega t}$  і прямокутна  $M_{\text{rect}}(t)=\sum_{n=1}^{\infty} (t/t_a - 1/2 - n/f_n t_n)$  є гіпотетичними і не відповідають реальним процесам модуляції випромінювання. В реальній ПК площина модуляції не співпадає з площиною зображення (мал.1), що призводить до викривлення прямокутних фронтів імпульсів освітленості.



Мал.1. Схема системи "об'єктив-модулятор-піввідикон".

Реальна функція модуляції має вигляд:

$$M_{\text{real}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( 1 + A \sin \left( \omega_m t - \frac{\omega_m t_{\text{фр}}}{2} \right) \right) \cdot \frac{2\pi}{\omega_m} n < t \leq \frac{2\pi}{\omega_m} n + t_{\text{фр}} \\ 1 & \frac{2\pi}{\omega_m} n + t_{\text{фр}} < t \leq \frac{\pi}{\omega_m} (2n + 1) \\ \frac{1}{2} \left( 1 + A \sin \left( \omega_m t - \frac{\omega_m t_{\text{фр}}}{2} \right) \right) \cdot \frac{\pi}{\omega_m} (2n + 1) < t \leq \frac{\pi}{\omega_m} (2n + 1) + t_{\text{фр}} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_m} (2n + 1) + t_{\text{фр}} < t \leq \frac{2\pi}{\omega_m} (n + 1) \end{cases}$$

$$A = \sin^{-1} \left( \frac{\omega_m t_{\text{фр}}}{2} \right)$$

$$t_{\text{фр}} = \frac{\delta_m}{d_m} \cdot \frac{D_0}{f'} t_n$$

(4)

де  $\omega_m = 2\pi f_m$ ,  $f_m$  - частота модуляції,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\delta_m$  - позовжнє зміщення установки модулятора,  $t_n$  - тривалість поля електронної розгортки.

В результаті вирішення задачі теплового балансу мішені (1,2,3) для  $M_{\text{sin}}(t)$  знайдено вихідний сигнал ПВ і одержано раніше не відому дійсну МПФ системи "модулятор-піввідикон" для режиму гармонічної модуляції:

$$\text{МПФ}_{\text{м-пв}}^{\text{sin}} = \frac{\sin(\pi f_m t_n)}{\pi f_m t_n} \cdot (1 + \alpha^2)^{-\frac{1}{2}} \cdot \sin(\omega_m t_0 - \omega_m t_n \cdot \frac{1}{2} - \Phi_s) \times (5) \\ \times (1 - \beta) \cdot (1 + \beta^2 - 2\beta \cdot \cos 2\pi f_m t_n)^{-\frac{1}{2}}$$

де  $\alpha = 2\pi D f_x^2 / f_m$  - дійсний параметр,  $\Phi_s = \arctg(1/\alpha)$ ;  $t_0$  - відносний зсув періоду модуляції і кадрової розгортки,  $\beta$  - коефіцієнт затримки  $\beta$  враховує явище неповного зчитування заряду.

Аналіз  $M\Phi_{\sin}$  виявляє сильну залежність виду  $M\Phi$  від сукупності таких параметрів як  $f_m$ ,  $\beta$ ,  $t_0$ . Так, на високих частотах модуляції, наприклад,  $f_m = 1/2t_n$  (тобто, 25 Гц для телевізійного стандарту) при  $\beta = 0,2-0,5$  значення  $M\Phi$  знижується в 1,5-3 рази на всьому діапазоні розрізняваних просторових частот  $f_x$ . При зменшенні  $f_m$  вплив  $\beta$  на  $M\Phi$  стає менш суттєвим. При збільшенні фазового зсуву модуляції та розгортки  $M\Phi_{\sin}$  стискаються в напрямі  $f_x \rightarrow 0$ . Найбільш рівномірна передача контрасту зображення різних просторових частот здійснюється на  $f_m = 1/2t_n$  із зсувом  $t_0 = t_n/4$ .

Однак, збільшити  $M\Phi_{\sin}$  на низьких  $f_x$  можна зменшенням  $f_m$ , наприклад, на  $f_m = 1/16t_n$  (3,125 Гц)  $M\Phi_{\sin}$  збільшується в  $\pi/2$  разів.

Аналіз  $M\Phi_{\text{rect}}$  показує, що режим прямокутної модуляції, в загальному випадку, дозволяє отримати більший сигнал, порівняно з гармонічною модуляцією. Однак, із збільшенням  $f_x$   $M\Phi_{\text{rect}}$  спадає швидше, ніж  $M\Phi_{\sin}$ . При  $\beta = 0$  зменшення  $f_m$  веде до зменшення  $M\Phi_{\text{rect}}$  на високих  $f_x$ . Однак, при  $\beta > 0$  із зменшенням  $f_m$  спостерігається специфічний ефект росту  $M\Phi_{\text{rect}}$  в області низьких  $f_x$ .

Для розв'язання рівнянь (1), (2), (3) з реальною функцією модуляції (4)  $M_{\text{real}}(t)$  було подано у вигляді згортки з періодичною послідовністю  $\delta$ -функцій. Вихідна кусочно описувана функція змінення піроелектричного заряду була знайдена за загальним принципом суперпозиції. В результаті отримано реальну  $M\Phi_{\text{m-тн}}$ . В результаті викривлення закону модуляції реальна  $M\Phi_{\text{m-тн}}$  потірається і на низьких  $f_m \rightarrow 0$  зменшується в  $\left[1 - \frac{\delta_m}{d_m} \left(\frac{D_0}{f}\right)\right]^{-1}$  разів, що на практиці досягає 12,5-62,5 %.

Показано, що при співпаданні площин модуляції і зображення, тобто  $\delta_m = 0$ ,  $M\Phi_{\text{real}}$  еквівалентна  $M\Phi_{\text{rect}}$  і має ті ж властивості. У зв'язку з наявністю синусоїдальної складової в сигналі при збільшенні  $\delta_m$  спостерігається деякий ріст  $M\Phi$  в діапазоні частот 1-3  $\text{мм}^{-1}$ . Результуюча  $M\Phi_{\text{шк}}$  ПК з об'єктивом, що має гаусову функцію розсіювання, має вигляд:

$$M\Phi_{\text{шк}}(f_x) = \frac{1}{\pi} \exp(-2\pi^2 t_0^2 f_x^2) \frac{\exp\left(\frac{-\alpha\pi}{2}\right)}{\text{ch} \frac{\alpha\pi}{2}} \cdot \left\{ \frac{1}{\alpha} \left[ \exp(\alpha\pi) - \exp\left(\alpha\pi \frac{\delta_m}{d_m} \frac{D_0}{f}\right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{\sin^{-1}\left(\frac{\pi}{2} \frac{\delta_m}{d_m} \frac{D_0}{f}\right)}{(1 + \alpha^2)^{\frac{1}{2}}} \left[ \exp\left(\alpha\pi \frac{\delta_m}{d_m} \frac{D_0}{f}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\delta_m}{d_m} \frac{D_0}{f} - \Phi_s\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\delta_m}{d_m} \frac{D_0}{f} + \Phi_s\right) \right] \right\} \quad (6)$$

Аналіз залежності  $MПФ_{шк}$  від  $\delta_m$  демонструє погіршення якості передачі контрасту зображення при збільшенні  $\delta_m$ . При  $\delta_m \rightarrow d_m(D_0/l)$   $MПФ_{шк}$  буде відрізнятися по полю мішені, що може привести до інвертування контрасту зображення, що також було підтверджено експериментально. Показано, що об'єктив мало впливає на  $MПФ_{шк}$ , головним чинником в просторово-частотній обробці зображення є система "модулятор-пірв'їдник".

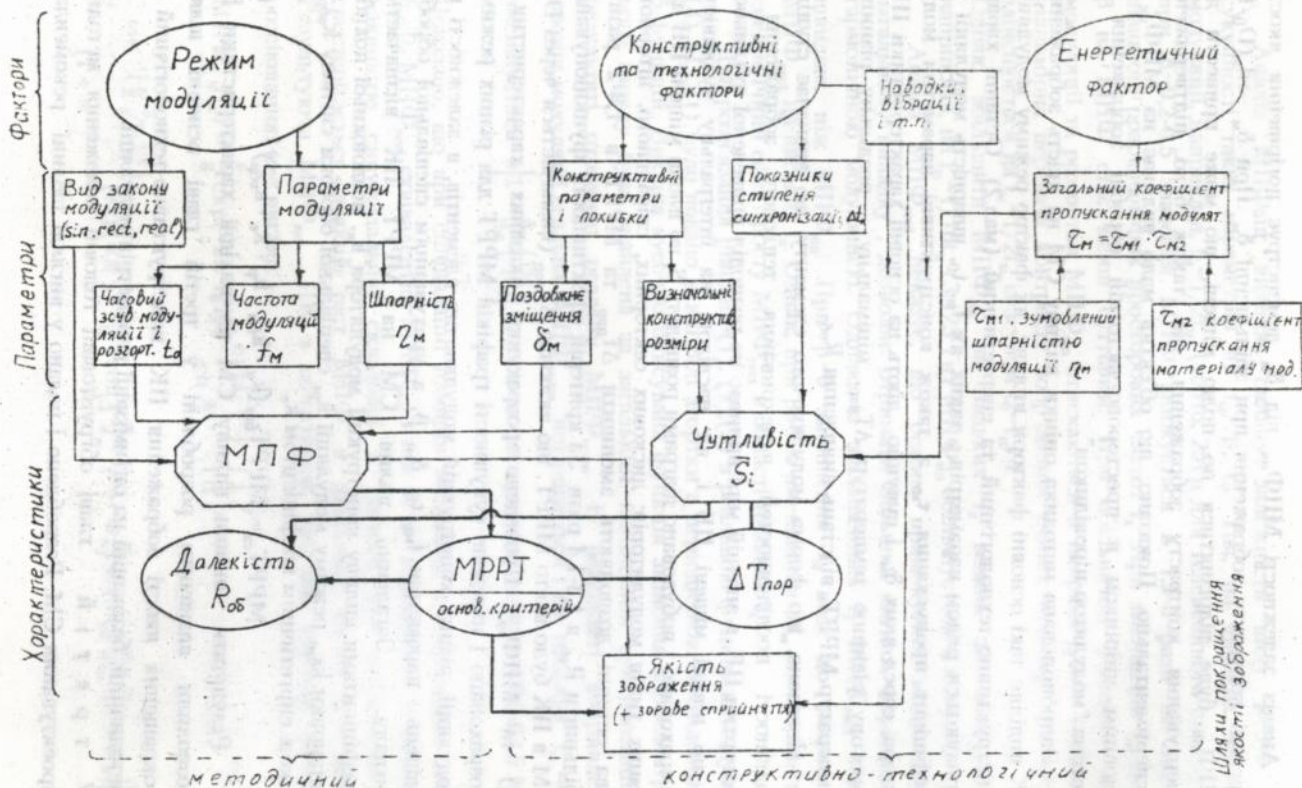
Запропонована методика оцінки впливу СМ на якість зображення ПК виділяє такі основні фактори впливу, як фактор режиму модуляції, конструктивно-технологічний та енергетичний (мал.2). Останні характеризуються рядом параметрів, таких як  $f_m$ ,  $t_0$ , шпарність модуляції  $\eta$ , коефіцієнт пропускання  $\tau_m$ , а також конструктивні параметри модулятора, серед яких  $\delta_m$ , і сукупно діють на основні характеристики ПК: порогову різницю температур  $\Delta T_{пор}$ , мінімальну роздільну різницю температур МРРТ, відстань виявлення  $R_{об}$ .

Показано, що форма модулюючого елемента, що визначає ступінь подібності послідовностей перекривання теплового зображення і розгортки ПВ, в значній мірі впливає на розподіл приведеної чутливості  $S_l$  по площі мішені ПВ і, як наслідок, на інтегральну чутливість. Розраховано і побудовано діаграми розподілу  $S_l$  по площі мішені ПВ для різних типів модуляторів: дискових секторних, спірального, шторного. Два останні дозволяють зменшити  $\Delta T_{пор}$  та МРРТ в 1,8-2 рази і збільшити  $R_{об}$  в 1,3-1,4 рази. За критерій ефективності функціонування СМ в ПК було взято МРРТ, що включає  $\Delta T_{пор}$  (визначається через  $D^*$  і  $S_l$ ) та  $MПФ_{шк}$ . Проведено розрахунки вказаних характеристик. Розраховано і наведено сукупності графіків МРРТ для різних режимів модуляції, різних конструкцій модулюючих елементів, в залежності від значень параметрів  $f_m$ ,  $t_0$ ,  $\delta_m$ ,  $\beta$ , з урахуванням спеціальної обробки сигналу. Загальний вплив СМ на МРРТ ПК визначається коефіцієнтами впливу конструкції модулятора  $k_k$ , поздовжньої похибки установки  $k_{\delta_m}$ , режиму модуляції  $k_p$ , спеціальної обробки сигналу  $k_{обр}$ , а також енергетичним коефіцієнтом  $k_e$ :

$$MRPT_{см} = MRPT_{баз} \cdot (k_k \cdot k_{\delta_m} \cdot k_p \cdot k_e \cdot k_{обр})^{-1} \quad (7)$$

Результати оцінки впливу СМ на вихідні характеристики ПК дозволили визначити розроблені у третій главі основні шляхи покращення якості зображення ПК: конструктивно-технологічний та методичний, базований на оптимізації параметрів модуляції.

У третій главі обгрунтовані головні положення методики проектування СМ. Розроблено і подано у вигляді таблиці рекомендації



Мал.2. Вплив СМ на основні характеристики та якість зображення ПК.

з вибору складу СМ і типу основних модулів в залежності від призначення ПК і умов експлуатації. Розроблено також методику з вибору режиму і параметрів модуляції ( $f_m$ ,  $t_0$ ) на різних етапах спостереження в залежності від просторово-частотних і температурних характеристик об'єктів спостереження і з урахуванням такого параметра ПК як ефективність зчитування. У числі рекомендацій показано, наприклад, що при використанні оптикоелектронного (наприклад, НІМ) модулятора в ПК з  $0 \leq \beta \leq 0,2$  перевагу мають такі режими: - гармонічна модуляція з  $f_m = 1/4t_u$  (12,5 Гц),  $t_0 = 0$  на етапі виявлення; - гармонічна модуляція з  $f_m = 1/2t_u$  (25 Гц),  $t_0 = t_u/4$  на етапі розпізнавання; - заключне спостереження в одному з цих режимів. Якщо ж для даної ПК  $0,2 < \beta \leq 0,8$ , то на першому етапі рекомендується  $f_m = 1/16 t_u$  (3,125 Гц),  $t_0 = t_u/2$ .

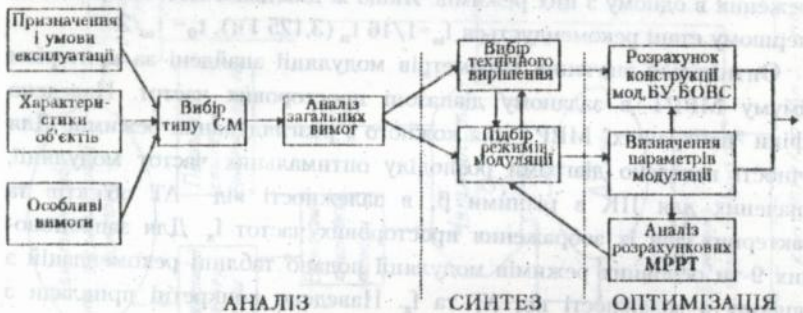
Оптимальні значення параметрів модуляції знайдені за критерієм мінімуму МРРТ в заданому діапазоні просторових частот. Наведено графіки "найкращих" МРРТ для кожного з розглядуваних режимів. Для наочності наведено діаграми розподілу оптимальних частот модуляції, визначених для ПК з різними  $\beta$ , в залежності від  $\Delta T$  об'єктів та характерних для їх зображення просторових частот  $f_x$ . Для запропонованих 9-ти основних режимів модуляції подано таблиці рекомендацій з їх вибору в залежності від  $\Delta T$  та  $f_x$ . Наведено конкретні приклади з використання методики. Так, наприклад, у ПК з  $\beta \approx 0,4$ , призначеній для спостереження об'єктів з  $\Delta T < 1^\circ\text{C}$ ,  $3\text{мм}^{-1} \leq f_x \leq 5\text{мм}^{-1}$  (контроль електронних схем) вибір НІМ, замість спірального механічного, і перехід від режиму прямокутної модуляції до гармонічної з  $f_m = 12,5$  Гц зменшує МРРТ не менше, як на 20%.

Сформульовані загальні вимоги до СМ, на основі яких конкретизовано вимоги до конструкції механічного модулятора. Наведено розроблені варіанти технічних вирішень модуляторів: з кулачковим компенсатором, двохсекторний спіральний, шторний та волоконно-оптичний, що відповідають згадуваним рекомендаціям і задовольняють ці вимоги найбільшою мірою.

Проведено аналіз можливих систем обробки вихідного сигналу ПВ, призначених в обов'язковому випадку для усунення різнополяриності сигналу ПВ в кадрах відкритого і закритого модулятора, і дано загальні рекомендації з їх побудови. Перевагу віддано аналогово-цифровим блокам обробки вихідного сигналу (БОВС). В аналоговому блоці здійснюється вирівнювання п'єдесталу, інвертування сигналу, корекція

рівня чорного та формування повного стандартного відеосигналу. В цифровому блоці для усунення постійних шумів і подвоєння корисного сигналу здійснюється попарна сумація інвертованих та неінвертованих кадрів. З урахуванням конструктивних вимог до модулятора ПК і фізичних основ методу модуляції на основі поглинання випромінювання в напівпровідниках обґрунтовано вибір інжекційного напівпровідникового модулятора для ПК, для якого проведена оптимізація товщини модулюючої шарунок.

Основні етапи розробленої методики проектування подано у вигляді схеми (мал.3).



Мал.3. Основні етапи методики проектування СМ для ПК.

У четвертій главі описано лабораторну установку, використану для перевірки ряду положень методики проектування СМ. Наведено результати експериментів з вибору типу і конструктивних параметрів механічного модулятора випромінювання для ПК. Показано, що застосування дискових секторних модуляторів на високих  $f_m$  є неприйнятним, так як зображення не може бути дешифрованим, а на  $f_m=12,5$  Гц призводить до інвертування контрасту. Найкращої якості зображення було досягнуто з диском із спеціально розрахованими робочими краями (одно- та двохсекторним) при  $\delta_m < 4$  мм. Досліджено вплив матеріалу модулюючого елемента на якість зображення. Описані лабораторні дослідження роботи ПК з експериментальним НПМ, що має такі характеристики:  $l_{\text{онт}}=5$  мм,  $\eta=0,7$ ,  $m=0,8$ ,  $\tau_m=0,87$ . Проведено експерименти з дослідження основних характеристик ПК, дано порівняння теоретичної і експериментальної залежностей МРРТ. Результати підтвердили необхідність оптимізації режиму модуляції. Статистичний аналіз результатів експериментів за критерієм Фішера

доводить адекватність математичної моделі та реальної ПК з СМ з 5% рівнем значимості. У главі наведено фотографії.

У висновку відзначається, що в дисертаційній роботі теоретично розроблено та експериментально підтверджено методику проектування СМ для ПК, що дає можливість покращити технічні характеристики і якість зображення ПК, що відображено у таких основних результатах:

1. На основі аналізу призначення, областей застосування, особливостей функціонування і проблем проектування ПК із СМ, а також методів і засобів модуляції випромінювання для ПК, проведено класифікацію ПК і СМ та розроблено узагальнену структурно-функціональну схему ПК із СМ, для якої запропоновано математичну модель.
2. На відміну від раніше відомих, вказана математична модель враховує роль модулятора як елемента, що здійснює просторово-частотну обробку зображення на вході ПК. Для розробленої математичної моделі одержано аналітичні вирази, що описують вихідний сигнал ПВ і відповідні МПФ системи "об'єктив-модулятор-піровідикон" для різних режимів модуляції, зокрема, вперше отримано дійсний вираз для МПФ режиму гармонічної модуляції. Проведено порівняльний аналіз режимів прямокутної і гармонічної модуляції. Доведена можливість просторово-частотної селекції зображення в режимі гармонічної модуляції, проаналізовано залежність МПФ (її значення і форми) від частоти модуляції та фазового зсуву модуляції відносно електронної розгортки.
3. Відмінною ознакою математичної моделі є також урахування реальних конструктивних параметрів модулятора. Для даної моделі досліджено вплив на вихідний сигнал ПВ величини  $\delta_m$ , що визначає зміщення вздовж оптичної осі площини модуляції і зображення. З цією метою вперше одержано не відоме раніше розв'язання рівняння теплопровідності мішені ПВ з граничними умовами, що включають кусочно описувану функцію модуляції. В результаті отримано аналітичний вираз для реальної МПФ ПК з СМ. Показано вплив величини  $\delta_m$  на змінення закону модуляції і його роль в просторово-частотній селекції зображення.
4. Аналітично досліджено й експериментально підтверджено вплив конструкції модулюючого елемента на приведену чутливість ПВ, одержано діаграми розподілу приведеної чутливості по полю мішені ПВ для кількох типів модуляторів: дискового секторного, спірального, типу завіси (стрічкового, матричного напівпровідникового). Показано, що найбільшу рівномірність чутливості дає третій, а також другий тип

модуляторів. Погіршення чутливості при використанні першого типу модулюючого елемента може досягати 50%.

5. Обґрунтовано вибір МРРТ як критерію ефективності роботи СМ. Одержано розрахункові характеристики МРРТ для різних режимів і параметрів модуляції, які можуть бути використані при проектуванні СМ.

6. Розроблено методику оцінки впливу СМ на основні характеристики ПК: Типор, Роб, МРРТ, введено рольові коефіцієнти впливу, що кількісно визначають міру змінення основних характеристик в залежності від факторів СМ. Запропонована методика враховує такі різноманітні фактори впливу СМ, як: методичний (режим і закон модуляції), конструктивно-технологічний (тип модулятора, його конструкція і т.п.), енергетичний (коефіцієнти пропускання, скважність модуляції і т.п.).

7. На підставі указанної методики розроблено загальні вимоги до СМ, що мають бути вихідними при проектуванні будь-якого типу СМ.

8. На підставі загальних вимог розроблено ряд конструкцій механічних модуляторів, що підвищують чутливість і, як наслідок, покращують основні характеристики ПК. Запропоновано конструкцію волоконно-оптичного модулятора для спеціального застосування в особливих умовах експлуатації ПК. Доцільність запропонованих конструкцій підтверджено авторськими свідоцтвами.

9. На основі аналізу схем обробки сигналу ПК в режимі модуляції і експериментальних досліджень дано рекомендації із схемного проектування блоків управління модулятора і обробки відеосигналу.

10. Теоретично і експериментально досліджена можливість застосування напівпровідникових модуляторів випромінювання в ПК, що в деяких задачах мають ряд переваг над механічними.

11. Розроблено рекомендації з вибору типу СМ в залежності від умов експлуатації, типу ПК і вирішуваних задач, де також вказано найкращі режими модуляції на різних етапах спостереження.

12. Розроблено методику підбору параметрів модуляції (частоти, зсуву фази) для різних режимів модуляції, з урахуванням ефективності зчитування ПВ, в залежності від передбачуваних середніх характеристик об'єктів спостереження, тобто ефективної різниці температур об'єкта і фону та просторово-частотних (або розмірних) характеристик об'єктів. Для визначення оптимальних параметрів модуляції одержано графічні залежності "найкращої" МРРТ.

13. Проведена експериментальна перевірка теоретичних результатів і технічних вирішень підтвердила адекватність математичної моделі реальній ПК, правильність вибору критерію ефективності СМ та обґрунтованість технічних вимог до СМ, а також деяких рекомендацій

і положень методики з вибору режиму модуляції та проектування блоків і вузлів СМ, що покращують якість зображення ПК.

14. Основними етапами розробленої методики проектування є такі:

1. Вибір типу СМ в залежності від призначення ПК.
2. Аналіз і оцінка можливостей виконання загальних вимог до СМ, пошук прийнятних технічних вирішень і вибір конкретної реалізації.
3. Розрахунок конструкції та схем управління модулятора згідно з режимами, рекомендованими запропонованою методикою.
4. Визначення необхідних параметрів режиму модуляції згідно з розробленою методикою. Аналіз розрахункових характеристик МРРТ для вибраних режимів та корекція прийнятих рішень.

Основні результати дисертації відображено у таких роботах:

1. Колобродов В.Г., Рыбалка В.В. Функция передачи модуляции пировидикона // Вестник Киев.политехи. ин.-та. Приборостроение.-1988.- Вып.18.-С.59-61.
2. Колобродов В.Г., Микитенко В.И., Рыбалка В.В. Предварительная обработка информации в тепловизоре на пировидиконе // Тепловидение : Межвуз.сб.научн.тр. - М.:МИРЭА.-1990.-Вып.8.- С.95-100.
3. Иванова В.В., Колобродов В.Г., Нестеренко И.А. Влияние модулятора на чувствительность пирокамеры // Оптический журнал.-1994.-N.2.-С.16-19.
4. Valentin G.Kolobrodov, Vita V.Rybalka. Pyroelectric camera modulation transfer function // Optical Engineering.-1995.- V.34.-N.4.-P.1044-1048.
5. Авторское свидетельство СССР N 258899 / Остафьев В.А., Колобродов В.Г., Микитенко В.И., Рыбалка В.В. / кл.Н01j 31/49, 1987.
6. Авторское свидетельство СССР N259733. / Колобродов В.Г., Рыбалка В.В., Микитенко В.И./кл.Н04 N 5/33, 1987.
7. Авторское свидетельство СССР N277370. / Колобродов В.Г., Микитенко В.И., Капштык С.Г., Рыбалка В.В. /кл.Н04 N 5/33, 1988.
8. Авторское свидетельство СССР N293080. / Остафьев В.А., Колобродов В.Г., Рыбалка В.В., Нестеренко И.А. /кл. Н01 j 31/49, 1989.
9. Колобродов В.Г., Порев В.А., Рыбалка В.В. Функция передачи модуляции // Тез. докл. Всесоюзн. научно-техн. конф. "Координатно-чувствительные фотоприемники и оптико-электронные устройства на их основе." -Барнаул: Алтайск. политехи. ин.-т. -1987.-С.24-25.
10. Колобродов В.Г., Рыбалка В.В. Влияние модулятора излучения на чувствительность пирокамеры. // Тез. докл. IV Всесоюзн. конф. "Тепловизионная медицинская аппаратура и практика ее применения - ТЕМН- 88".-Л.-ГОИ им.Вавилова С.И.-1988.-С.36-37.

### Аннотация

Иванова В.В. Системы модуляции для пирокерамы.

Рукопись диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 - оптические и оптико-электронные приборы, ИТУУ "КПИ", Киев, 1996.

В диссертации решена проблема разработки методики проектирования системы модуляции, улучшающей технические характеристики и качество изображения пирокерамы. Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что модулятор излучения осуществляет пространственно-частотную обработку изображения на входе пирокерамы. Разработанные требования к системе модуляции, методики выбора типа системы модуляции и согласования режима модуляции с задачами наблюдения, а также варианты конструктивных решений различных типов модуляторов, позволяют увеличить чувствительность, дальность обнаружения пирокерамы и минимальную разрешаемую разность температур.

### Abstract

Ivanova V.V. Modulation systems for pyrocameras.

The manuscript of the dissertation for the Ph.D. scientific degree in technical sciences, speciality 05.11.07 - optical and optical-electronic systems. National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 1996.

The elaboration problem of the modulation design methodology which improves the pyrocamera technical characteristics and the image quality has been solved in the dissertation. The theoretical and experimental investigations had revealed a modulator performed a spatial frequency image processing at a pyrocamera outset. The modulation system technical requirements, the modulation system type choice method and the modulation regime and the observation tasks coordination method as well as the different modulator constructions, enable to increase the pyrocameras responsivity, detection distant and to improve a minimal resolvable temperature.

Ключові слова: модулятор інфрачервоного випромінювання; модуляційна передаточна функція; пирокерама; пировідкон.



AV 36.402