



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **158833** (13) **U**
(51) МПК (2025.01)
G01J 5/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2024 02859	(72) Винахідник(и): Гордієнко Едуард Юрійович (UA), Шустакова Галина Володимирівна (UA), Фоменко Юлія Вікторівна (UA), Шевченко Сергій Миколайович (UA)
(22) Дата подання заявки: 29.05.2024	
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 27.03.2025	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 26.03.2025, Бюл.№ 13	(73) Володілець (володільці): ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР ІМ. Б.І. ВЕРКІНА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ, просп. Науки, 47, м. Харків, 61103 (UA)

(54) ІНФРАЧЕРВОНА ТЕПЛОВІЗІЙНА КАМЕРА ДЛЯ АНАЛІЗУ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ

(57) Реферат:

Інфрачервона тепловізійна камера для аналізу низькотемпературних теплових полів включає внутрішній еталонний інфрачервоний випромінювач з металевою шторкою з коефіцієнтом випромінювання поверхні, рівним 0,99, механічний двокоординатний сканер, фотоприймальний пристрій, розташований на оптичній осі за сканером, електронний блок на основі цифрового сигнального процесора, оперативний запам'ятовуючий пристрій, контролер USB-інтерфейсу та блок електричного живлення. На поверхні металевої шторки закріплено дзеркало з коефіцієнтом відбиття інфрачервоного випромінювання, рівним 0,95, у широкому спектральному діапазоні довжин хвиль.

UA 158833 U

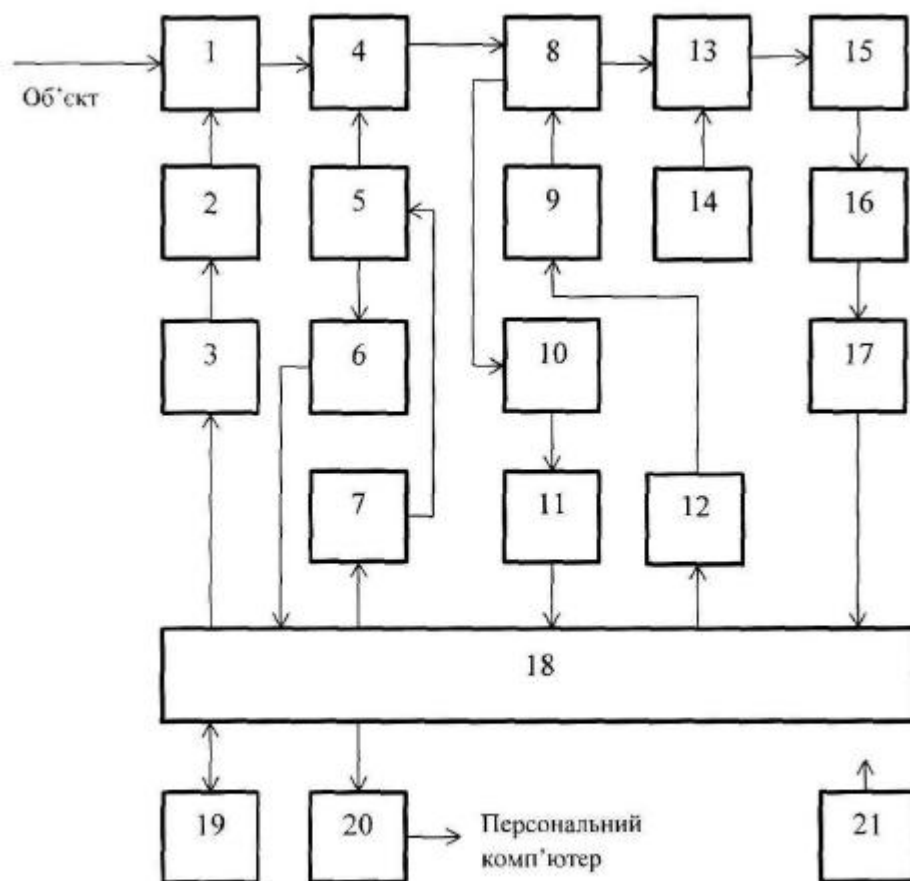


Fig. 1

Корисна модель належить до способів створення теплових зображень та систем для аналізу низькотемпературних теплових полів, які працюють в інфрачервоному діапазоні випромінювання, і може бути використана в наукових дослідженнях низькотемпературних процесів та в кріомедицині для неінвазивного дистанційного інтраопераційного контролю кріодеструкції патологічних новоутворень.

Більшість завдань сучасної теплової діагностики потребує як якісного відображення теплових полів, так і їх кількісної оцінки з мінімальною похибкою. Великий інтерес представляє дистанційний вимір динаміки низькотемпературних теплових полів, зокрема, на поверхні біологічних об'єктів у процесі кріогенної деструкції патологічних утворень. При використанні інструменту, що охолоджується рідким азотом, температура тканини може досягати -150°C і нижче. Особливий інтерес представляє дистанційний неінвазивний контроль поширення температурної межі зони некрозу (загибелі патологічної тканини) безпосередньо під час операції. При цьому температури некрозу для злоякісних утворень досягають до -60°C . Однак діапазон вимірювання мінусових температур на поверхні об'єктів дослідження для більшості серійних тепловізорів обмежується -30°C та досягає -40°C для найкращих тепловізорів. Сучасні інфрачервоні детектори мають достатню чутливість для реєстрації випромінювання холодних об'єктів (об'єктів з мінусовою температурою). Але при пониженні температури об'єкта приблизно до -50°C , тепловий потік з його поверхні вже настільки малий, що становиться зрівняним з тепловим потоком з поверхні оптичних елементів тепловізора. Для досягнення достатньої точності вимірювання необхідно застосування спеціальних методів та засобів в конструкціях апаратної та програмної частини приладу для виключення впливу теплового випромінювання оптичних елементів і, особливо, коливань його інтенсивності в процесі роботи прибору. Наприклад, застосування періодичного радіометричного калібрування за допомогою внутрішнього еталонного інфрачервоного випромінювача.

Відома інфрачервона тепловізійна камера для аналізу теплових полів [Гордієнко Е.Ю., Шустакова Г.В., Фоменко Ю.В., Глушук М.І., Багатоелементний медичний тепловізор, матеріали щорічної науково-технічної школи-семінару "Біологічна і медична інформатика та кібернетики (БМІК-2012)", Київ 2012, стор. 121-126], яка містить інфрачервоний об'єктив, багатоелементний інфрачервоний детектор на основі матриці мікроболометрів, що не охолоджуються, внутрішній еталонний випромінювач, електронний блок та персональний комп'ютер.

Недоліком цієї камери є неможливість вимірювання теплових полів об'єктів з температурою нижче ніж -20°C .

Відома інфрачервона тепловізійна камера для наукових досліджень [V. Yefremenko, E. Gordiyenko, G. Shustakova et al. A Broadband imaging system for research applications. // Review of Scientific Instruments. 2009. V.80, PP.056104], яка містить інфрачервоний об'єктив, одноелементний інфрачервоний детектор у оптичному кріостаті, що охолоджується рідким азотом, механічний двокоординатний сканер, внутрішній еталонний інфрачервоний випромінювач у вигляді спеціальної металевої шторки, яка розташована на вході оптичної схеми приладу, електронний блок, блок електричного живлення та персональний комп'ютер.

Недоліком відомої камери є те, що при дослідженні об'єктів з температурою від -30°C і нижче спостерігається значне погіршення точності температурних вимірювань через неврахування залежності значення калібровочних коефіцієнтів від температури об'єкта що вимірюється. Відносна похибка температурних вимірювань для об'єктів з температурою -150°C перевищує 20 %.

В основу корисної моделі поставлена задача розробити інфрачервону тепловізійну камеру для аналізу низькотемпературних теплових полів, яка дозволить уникнути втрати точності вимірювання температури холодних об'єктів.

Поставлена задача вирішується тим, що інфрачервона тепловізійна камера для аналізу низькотемпературних теплових полів, що містить внутрішній еталонний інфрачервоний випромінювач з металевою шторкою з коефіцієнтом випромінювання поверхні, рівним 0,99, механічний двокоординатний сканер, фотоприймальний пристрій, розташований на оптичній осі за сканером, електронний блок на основі цифрового сигнального процесора, оперативний запам'ятовуючий пристрій, контролер USB-інтерфейсу та блок електричного живлення, на поверхні металевої шторки закріплено дзеркало з коефіцієнтом відбиття інфрачервоного випромінювання, рівним 0,95, у широкому спектральному діапазоні довжин хвиль.

Додавання дзеркала з коефіцієнтом відбиття інфрачервоного випромінювання, близьким до 0,95, у широкому спектральному діапазоні довжин хвиль на поверхню спеціальної металевої шторки дозволяє створити комбіновану випромінюючу здатність її поверхні.

Підвищення точності вимірювання температури холодних об'єктів відбувається завдяки додатковому застосуванню диференційного сигналу відгуку детектора на почорнену ділянку

шторки та ділянку, яка містить дзеркало при обробці сигналу для кожного пікселя теплового зображення.

Суть корисної моделі пояснюють креслення.

На фіг. 1 наведено схему інфрачервоної тепловізійної камери для аналізу низькотемпературних теплових полів, що заявляється.

На фіг. 2 наведено фотографію внутрішнього еталонного інфрачервоного випромінювача з комбінованим коефіцієнтом випромінювання поверхні.

Інфрачервона тепловізійна камера для аналізу низькотемпературних теплових полів (фіг. 1), що запропонована, складається з механічного двокоординатного сканера (4-12), який складається з дзеркала вертикальної розгортки зображення (4), крокового двигуна приводу дзеркала вертикальної розгортки (5) з датчиком крайнього положення дзеркала вертикальної розгортки (6) та електричного буфера крокового двигуна приводу дзеркала вертикальної розгортки (7), дзеркала горизонтальної розгортки зображення (8) з датчиком миттєвого положення дзеркала горизонтальної розгортки (10), пари котушок електромагнітів (9) з електричними буферами (12), аналого-цифрового перетворювача сигналу миттєвого положення дзеркала горизонтальної розгортки (11), внутрішнього еталонного інфрачервоного випромінювача зі спеціальною металевою шторкою (1) на вході оптичної схеми, що містить електричний двигун приводу шторки (2) та електричний буфер двигуна приводу шторки (3), фотоприймального пристрою (13-17), розташованого на оптичній осі за сканером, що складається з інфрачервоного об'єктива (13) з механічним приводом (14) для ручного фокусування зображення, інфрачервоного детектора (15), який розташовано у металевому оптичному кріостаті та який охолоджується рідким азотом, попереднього підсилювача електричного сигналу (16) та аналого-цифрового перетворювача (17). електронного блока на основі цифрового сигнального процесора (18), оперативного запам'ятовуючого пристрою (19), контролера USB-інтерфейсу (20) для передачі даних теплового зображення до персонального комп'ютера та блока електричного живлення (21).

Пристрій працює наступним чином (фіг. 1). Формування растру теплового зображення здійснюються за допомогою механічного двокоординатного сканера (4-12), який складається з двох дзеркал, які коливаються у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Сканування зображення у горизонтальному напрямку здійснюється за рахунок резонансних коливань дзеркала (8), яке закріплене на металевій пластині та пружині. Незатухаючі резонансні коливання дзеркала (8) підтримуються за рахунок послідовності прямокутних електричних імпульсів, які генеруються сигнальним процесором електронного блока (18), та через електричні буфери (12) збуджують електромагніти (9), які розташовані під металевою пластинною, на якій закріплено дзеркало (8). Резонансна частота коливань залежить від маси дзеркала та жорсткості пружини і в даній конструкції становить приблизно 100 Гц. Миттєве положення дзеркала (8) відстежується датчиком миттєвого положення (10) на основі оптопари фотодіод-світлодіод з відкритим оптичним каналом, амплітуда сигналу з якого пропорційна куту відхилення дзеркала. Сигнал з датчика положення дзеркала (10) перетворюється в цифрову форму за допомогою аналого-цифрового перетворювача (11), та використовується програмним забезпеченням сигнального процесору електронного блока (18) для здійснення незатухаючих резонансних коливань та стабілізації їх амплітуди на заданому рівні шляхом регулювання тривалості імпульсів струму на електромагнітах (9) за відповідним алгоритмом.

Сканування зображення у вертикальному напрямку здійснюється за допомогою дзеркала (4), яке приводиться у коливальну дію кроковим двигуном (5) приводу дзеркала (4). Керуюча послідовність електричних імпульсів для обертання двигуна (5) в прямому та зворотному напрямках генерується сигнальним процесором електронного блока (18), та через електричний буфер (7) подається на двигун (5).

Сканування двомірного зображення відбувається наступним чином. Перед початком сканування дзеркало вертикальної розгортки (4) переміщується у крайнє верхнє положення, що відбувається завдяки безперервному обертанню крокового двигуна (5) у зворотному напрямку до появи сигналу датчика крайнього положення дзеркала вертикальної розгортки (6). В цей час електронним блоком (18) формується сигнал кадрової синхронізації. Дзеркало горизонтальної розгортки (8) здійснює сканування одного рядка зображення завдяки повороту з одного крайнього положення в інше, що контролюється датчиком миттєвого положення дзеркала горизонтальної розгортки (10). На початку сканування рядка зображення електронним блоком (18) генерується сигнал рядкової синхронізації. Сигнали кадрової та рядкової синхронізації засинхронізовані з імпульсами основного тактового генератора, джерелом яких є сигнальний процесор електронного блока (18). Після появи сигналу рядкової синхронізації внутрішній програмний таймер сигнального процесору електронного блока (18) відраховує 256 імпульсів

основного тактового генератора, які використовуються як сигнал піксельної синхронізації, та за якими відбувається вибірка сигналу пікселів рядка теплового зображення. Далі генерується сигнал на кроковий двигун (5), за яким він робить один крок у прямому напрямку, тим самим переміщуючи дзеркало вертикальної розгортки (4) на кут, необхідний для сканування наступного рядка зображення. В цей час дзеркало горизонтальної розгортки (8) здійснює переміщення у зворотному напрямку до крайнього положення. Така послідовність зберігається протягом сканування 256 рядків зображення. Оскільки дзеркала оснащені датчиками їх положення таким чином, що здійснюється однозначна прив'язка положення миттєвого поля зору детектора випромінювання (15) у просторі предметів та електричного сигналу, що формується фотоприймальним пристроєм (13-17).

Формування теплового зображення форматом 256×256 пікселів, де кожний піксель представляється у цифровому вигляді та несе інформацію про інтенсивність теплового випромінювання відповідної ділянки об'єкта, що спостерігається, відбувається наступним чином. Після сканування кожного попереднього кадру зображення сигнальний процесор електронного блока (18) генерує сигнал, який через електричний буфер (3) приводить у рух електричний двигун приводу (2) та зачиняє шторку (1). Шторка (1) з дзеркалом у центрі на її поверхні розташована на оптичній осі на вході перед сканером і в зачиненому стані перекриває все поле зору приладу таким чином, що на детектор (15) падає потік випромінювання з її поверхні. Далі сигнальний процесор електронного блока (18) генерує послідовність керуючих імпульсів для обертання крокового двигуна (5) приводу дзеркала вертикальної розгортки (4) на 128 кроків в зворотному напрямку для переміщення дзеркала таким чином, що в миттєве поле зору детектора (15) по вертикалі попадає середина поверхні шторки. Так як сканування зображення в горизонтальному напрямку здійснюється безперервно, за сигналами рядкової та піксельної синхронізації процесор електронного блока (18) робить вибірку сигналу однієї строки з 256 пікселів на виході аналого-цифрового перетворювача (17). Усереднене значення перших 20 пікселів $U_{шт.}$, що відповідають відгуку детектора, коли в його поле зору попадала почорнена ділянка шторки та усереднене значення 20 пікселів зсередини строки $U_{шт.}^0$, що відповідають відгуку детектора, коли в поле зору попадала ділянка шторки з закріпленим дзеркалом запам'ятовуються в оперативному запам'ятовуючому пристрої (19), та зберігаються до наступного кадру зображення. Далі сигнальний процесор електронного блока (18) генерує сигнал, який приводить у рух в зворотному напрямку електричний двигун (2) приводу шторки (1) та переводить її у відчинений стан. Одночасно дзеркало вертикальної розгортки (4) переміщується у крайнє верхнє положення, що відбувається завдяки безперервному обертанню крокового двигуна (5) у зворотному напрямку до появи сигналу з датчика крайнього положення (6). Далі, після генерації сигналу кадрової синхронізації, що свідчить про те, що сканер почав сканування нового кадру теплового зображення, за сигналами рядкової та піксельної синхронізації відбувається послідовна вибірка миттєвого сигналу $U_{x,y}$ на виході аналого-цифрового перетворювача (17) для пікселів теплового зображення. У реальному часі сигнал для кожного пікселя зображення $U_{об_xy}$ оброблюється за наступним алгоритмом, та зберігається у оперативному запам'ятовуючому пристрої (19) у буфері кадру форматом 256 рядків по 256 пікселів:

$$U_{об_xy} = (U_{x,y} - U_{шт.}) + 1053(U_{шт.} - U_{шт.}^0). \quad (1)$$

Суть обробки сигналу, яка дозволяє підвищити точність температурних вимірювань, полягає у наступному. Диференціальний сигнал $\Delta U_{x,y} = U_{x,y} - U_{шт.}$ виключає складову сигналу відгуку детектора, обумовлену випромінюванням оптичних елементів, що додається до основного теплового потоку на шляху до детектора, оскільки теплове випромінювання від зачиненої шторки та об'єкта, що спостерігається, проходять той самий оптичний шлях. Але значення диференціального сигналу залежить від різниці теплових потоків з поверхні об'єкта та почорненої ділянки шторки. Оскільки температура шторки може змінюватися у процесі роботи приладу, нехтувати вкладом теплового потоку з її поверхні без втрати точності температурних вимірювань не можна. З другого боку, коли шторка зачинена і в поле зору фотоприймального пристрою (13-17) потрапляє її ділянка з закріпленим дзеркалом, на детектор падає відбитий від дзеркала потік випромінювання, створюваний самим детектором та його охолоджуваною діафрагмою. Оскільки детектор охолоджується рідким азотом ($T=77\text{ K}$), то таке дзеркало можна розглядати як випромінювач з дуже низькою мінусовою температурою. Причому його радіаційна температура значно нижче температури почорненої ділянки. Таким чином, диференціальний сигнал відгуку на теплові потоки з обох ділянок $\Delta U_{шт.} = U_{шт.} - U_{шт.}^0$ визначається в основному тільки потоком з почорненої ділянки без додаткового вкладу випромінювання з оптичних

елементів, оскільки теплові потоки від обох ділянок теж проходять однаковий шлях до детектора. Нарешті, результат додавання диференціального сигналу $\Delta U_{шт}$, обумовленого тепловим потоком з почорненої ділянки шторки до диференціального сигналу $\Delta U_{х,у}$, обумовленого різницею теплових потоків з поверхні спостережуваного об'єкта та почорненої ділянки шторки дорівнює сигналу $U_{об_х,у}$, який визначається інтенсивністю випромінювання лише з поверхні об'єкта, та не залежить від температури шторки та оптичних елементів приладу.

Вивід теплового зображення у реальному часі відбувається на моніторі персонального комп'ютера. Обмін даними з комп'ютером відбуваються через стандартний USB-інтерфейс за допомогою контролера (20) таким чином, що при формуванні поточного кадру теплового зображення водночас передаються дані попереднього кадру. Програмне забезпечення тепловизора, орієнтоване під операційну систему Windows, має великий набір функцій для візуалізації і обробки теплових зображень, а також проведення температурних вимірювань.

Для проведення вимірювання температури на поверхні об'єкта виконується калібрування приладу. За допомогою моделі АЧТ з регульованою температурою вимірюється докладна калібровочна характеристика $U_{АЧТ}=f(T_{АЧТ})$ в дискретних температурних точках, де $U_{АЧТ}$ - значення сигналу, яке розраховується з виразу (1), $T_{АЧТ}$ - температура АЧТ. Для розрахунку використовується усереднене значення масиву пікселів в центрі теплового зображення АЧТ. Далі інверсна калібровочна характеристика $T_{АЧТ}=f(U_{АЧТ})$ апроксимується кубічною поліноміальною залежністю наступного вигляду:

$$T_{АЧТ}(U_{АЧТ}) = a_0 U_{АЧТ}^3 + a_1 U_{АЧТ}^2 + a_2 U_{АЧТ} + a_3, \quad (2)$$

де a_0, a_1, a_2, a_3 - коефіцієнти поліному.

Температура об'єкта $T_{об_х,у}$ для будь-якого пікселя зображення із застосуванням апроксимації інверсної калібровочної характеристики розраховується із наступного вираження:

$$T_{об_х,у} = \frac{T_{АЧТ}(U_{об_х,у})}{\sqrt[4]{\epsilon_{об_х,у}}}, \quad (3)$$

де $\epsilon_{об_х,у}$ - коефіцієнт випромінювання поверхні об'єкта для відповідного пікселя зображення.

Розроблено інфрачервону тепловізійну камеру для аналізу низькотемпературних теплових полів, точність вимірювання температури холодних об'єктів якої не перевищує 3 % (температура об'єкта $T_{об} \sim -150$ °C).

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Інфрачервона тепловізійна камера для аналізу низькотемпературних теплових полів, що містить внутрішній еталонний інфрачервоний випромінювач з металевою шторкою з коефіцієнтом випромінювання поверхні, рівним 0,99, механічний двокоординатний сканер, фотоприймальний пристрій, розташований на оптичній осі за сканером, електронний блок на основі цифрового сигнального процесора, оперативний запам'ятовуючий пристрій, контролер USB-інтерфейсу та блок електричного живлення, на поверхні металевої шторки закріплено дзеркало з коефіцієнтом відбиття інфрачервоного випромінювання, рівним 0,95, у широкому спектральному діапазоні довжин хвиль.

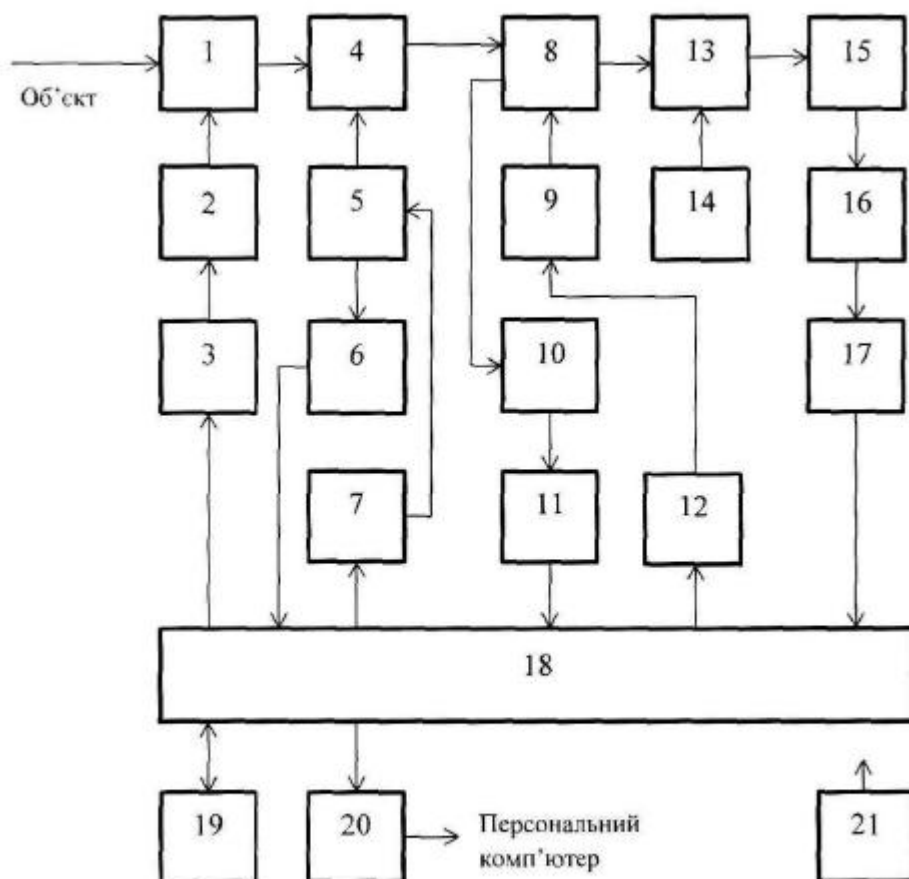


Fig. 1



Fig. 2