УДК 536.51

ПІДХОДИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТІЛА ЛЮДИНИ БЕЗКОНТАКТНИМИ ІЧ ТЕРМОМЕТРАМИ

ФУРМАНОВА Н.І. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: nfurmanova@gmail.com;

ФАРАФОНОВ О.Ю. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: farafon@zntu.edu.ua;

МАЛИЙ О.Ю. канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: docsasha2@gmail.com;

ПІРОЖЕНКО О.О. аспірант кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

Мета роботи: *проаналізувати існуючі підходи вимірювання температури тіла людини, запропонувати підходи для підвищення точності вимірювання.*

Методи дослідження: *аналітичний, експериментальний.*

Отримані результати. *У статті розглянуто підходи до підвищення точності вимірювання температури тіла безконтактними інфрачервоними термометрами. Проаналізовано параметри інфрачервоних вимірювачів температури. Запропоновано склад системи для збору статистичної інформації щодо впливу факторів навколишнього середовища на точність вимірювань. Запропоновано програмне забезпечення для проведення досліджень. Наведено статистичні дані вимірювань. Вказано шляхи підвищення точності вимірювань безконтактними інфрачервоними термометрами. Запропоновані математичне та фізичне забезпечення безконтактного вимірювання температури, проведений аналіз параметрів інфрачервоних вимірювачів температури тіла, розроблено систему для отримання статистичної інформації для виявлення факторів впливу, проведено аналіз результатів.*

Наукова новизна. *Запропоновано уточнену формулу для визначення температури тіла, що містить такі параметри: специфічна стала для окремого пристрою, що залежить від оптичної системи фокусування та поглинаючого матеріалу; ступінь випромінювання об'єкта, що залежить від матеріалу об'єкту, температура якого вимірюється; абсолютна температура об'єкта, що вимірюється; абсолютна температура зовнішнього середовища; відбите випромінювання зовнішнього середовища; абсолютна температура корпусу датчика пірометра.*

Практична цінність. *В роботі запропоновані рекомендації, що здатні в значній мірі підвищити точність вимірювань при проектуванні систем, що містять інфрачервоні термометри.*

Ключові слова: *термометрія; інфрачервоний; точність; статистичні вимірювання; похибка*

I. ВСТУП

Вимірювання температури тіла звичайними контактними методами займає досить багато часу, додатково потребує безпосереднього контакту вимірювального приладу з пацієнтом, який може бути заразним, що призведе до поширення вірусної інфекції.

Особливо гостро постало питання швидкого вимірювання температури тіла на пропускних пунктах підприємств різних сфер економіки. Вимірювання температури було впроваджено задля запобігання розповсюдженню вірусної інфекції у великих колективах людей. Контактні способи вимірювання для даного завдання не дуже добре підходять через порівняно високий час вимірювання, що в свою чергу уповільнює пропускної процес на підприємствах.

При поширенні коронавірусної інфекції COVID-19 широке застосування знайшли безконтактні (інфрачервоні) термометри [1], які мають безліч переваг.

Переваги дистанційного виміру температури тіла:

1) Дистанція. Залежно від завдання використовують апаратуру, яка дозволяє зчитувати температуру тіла на достатній відстані від людини (до 2 м). Обстеження проходить без контакту і значної зупинки руху - таке рішення підходить для масової перевірки без заторів.

2) Візуалізація результатів. Апаратура автоматично виводить параметри на дисплей і на екран комп'ютера, підсвічує зображення людей з підвищеною

© Фурманова Н.І., Фарафонов О.Ю., Малий О.Ю., Піроженко О.О., 2021
DOI 10.15588/1607-6761-2021-1-6

температурою.

3) Сповіщення. Залежно від налаштувань електронного дистанційного вимірювача, при виявленні небезпеки прилад для вимірювання температури тіла людини на відстані відправляє оповіщення на пульт служби охорони, блокує прохід, включає сигнал тривоги.

Загалом: прилад для вимірювання температури тіла людини на відстані показує досить точну інформацію, допомагає виявити людей з симптомами коронавірусу і інших захворювань, працює як датчик охоронної мережі. При спрацьовуванні відомості зберігаються в системі.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛКІКАЦІЙ

Вимірювання температури безконтактними термометрами стало масовим явищем та викликає значний інтерес у інтернет спільноти. Давно відомо, що вплив зовнішніх факторів може призвести до значних відхилень при вимірюванні [2]. За час пандемії вимірювання температури тіла безконтактними методами перейшло з медичної сфери у кожний заклад суспільного призначення, а термографія у медицині розвивається швидкими темпами [3]. Методи пірометрії та розробка точних пристроїв вимірювання температури – об'єкт постійної уваги вчених та інженерів [4], [5], [6], але вплив сучасних реалій та вимоги щодо протидії поширення covid19 призводять до зміщення інтересу наукової спільноти з промислового застосування безконтактних вимірювачів температури у область вимірювання температури тіла людини [7], [8], [9]. Окремим напрямком досліджень та застосуванням у медичних цілях є радіотермометрія для внутрішніх органів [10], [11], [12]. Однак існує ще досить великий розрив між роботами біомедичного спрямування та наробітками в галузі промислового застосування безконтактних вимірювачів. В першу чергу, це пов'язано зі складною динамічною багатошаровою структурою, якою для вимірювачів є людина. По-друге, виникають прогалини стосовно метрологічного забезпечення проведення вимірювань.

III. МЕТА РОБОТИ

У табл.1 наведено порівняння різних методів вимірювання температури тіла людини за такими характеристиками як точність вимірювання та швидкість вимірювання. З табл. 1 видно, що найточнішим методом вимірювання є вимірювання контактним методом за допомогою ртутного градусника, а найшвидшим – вимірювання за допомогою стаціонарного теплові зору. Однак використання ртутного градусника потребує контакту з тілом ймовірно зараженої людини та швидкість вимірювання занизька. Використання стаціонарного тепловізору хоча й має високу швидкість, але найчастіше недоступне для більшості підприємств з причин великої ціни. Отже, оптимальним методом вимірювання, що забезпечує достатню швидкість, має відсутність безпосереднього контакту з тілом та при цьому має доступну для будь-якого підприємства вартість, є використання пірометрів.

Точність вимірювання 0,5°С при визначенні температури тіла людини не може повністю гарантувати відсутність перевищення межових показників здорової людини, а отже існує проблема підвищення точності вимірювання пірометрами [13]. Задачами дослідження є виявлення факторів, що впливають на точність вимірювання інфрачервоними безконтактними термометрами та пропонування підходів для мінімізації цих впливів, що дозволить підвищити точність вимірювання з метою забезпечення точного розуміння чи знаходиться температура тіла людини в межах здорового стану.

Таблиця 1. Показники точності та швидкості вимірювання температури різними типами пристроїв

Пристрій	Точність вимірювання, °С	Швидкість вимірювання
Ртутний градусник	0,1	1 людина за 10 хвилин
Електронний градусник	0,2	>1 людини за 1 хвилину
Пірометр	0,5	1 людина за 2 секунди
Ручний тепловізор	1	1 людина за 2-3 секунди
Стаціонарний тепловізор	0,3	за 0,5 секунди до 30 людей одразу

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Математичне та фізичне забезпечення безконтактного вимірювання температури

Для розуміння від чого залежить точність вимірювання безконтактним методом ІЧ термометрії було проведено аналіз типової структури методу, фізичних та математичних основ вимірювань.

Будь-яке нагріте тіло, що має температуру вище абсолютного нуля (273К), в тому числі організм людини, випромінює електромагнітні хвилі в широкому спектрі частот [14]. Глибина ефективного вимірювання температури дорівнює товщині випромінюючого шару (скін-шар) і визначається як відстань, на яке поширюється електромагнітна хвиля від поверхні об'єкта до того шару, в якому її інтенсивність зменшується в 2,73 рази. За інших рівних умов чим більше довжина хвилі, тим більше глибина, з якою можна реєструвати температурні обурення. Максимум інтенсивності теплового радіовипромінювання при звичайній температурі навколишнього середовища лежить в

інфрачервоній області спектра (рис. 1). Це зумовило доцільність створення ІЧ термографії для дослідження температурних аномалій. Однак, вимір теплового випромінювання тіла людини в ІЧ діапазоні дає справжню температуру тільки самого верхнього шару шкіри товщиною в долі міліметра.

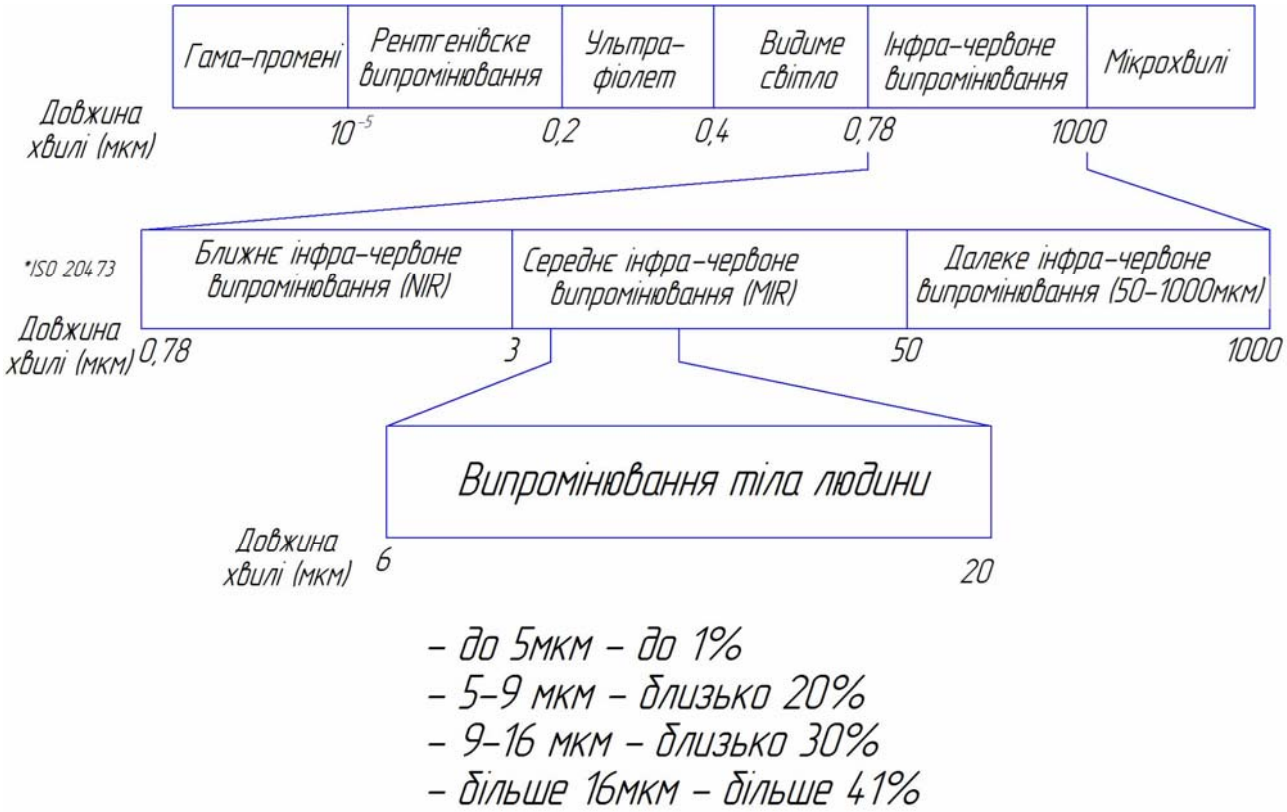

Рисунок 1. Місце та розподіл інфрачервоного випромінювання тіла людини в загальному спектрі випромінювання

Отже, для вимірювання ІЧ випромінювання тіла людини використовують прилади, що мають поглинаючий шар (детектор ІЧ випромінювання) в описаному вище діапазоні та загалом мають структуру, що наведена на рис. 2.

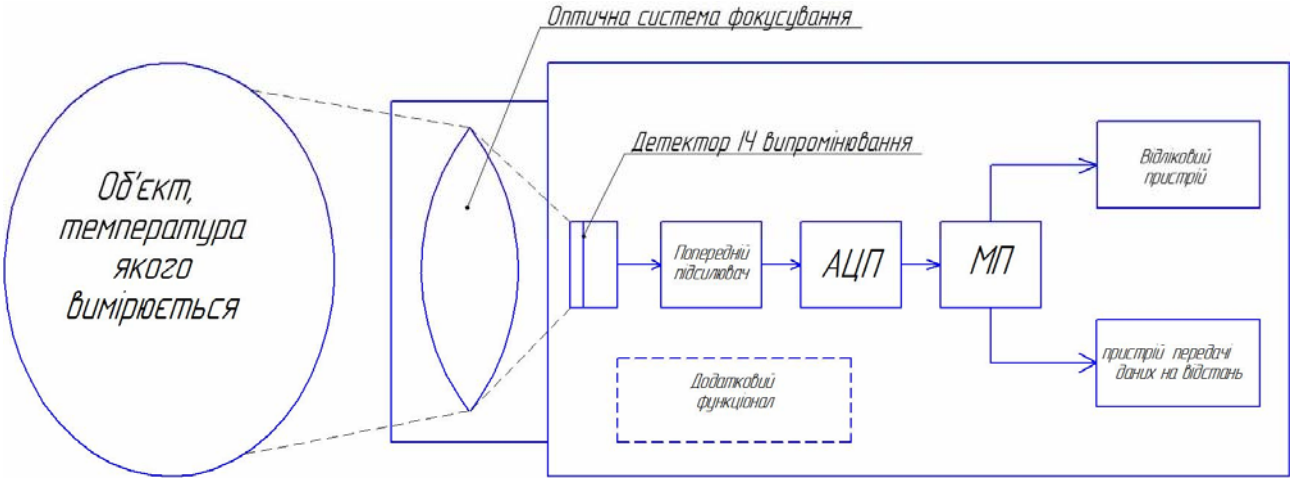

Рисунок 2. Типова структура ІЧ вимірювача температури тіла людини

Внаслідок надходження електромагнітного випромінювання на детектор ІЧ випромінювання вини-

кає електричний сигнал, який можна точно проаналізувати. Сигнал детектора U і температура об'єкта T_{obj} мають наступний взаємозв'язок:

$$U \sim \varepsilon \cdot T_{obj}^4 , \quad (1)$$

де U – сигнал детектора;

ε – ступінь випромінювання об'єкта, що залежить від матеріалу об'єкту, температура якого вимірюється;

T_{obj} – абсолютна температура об'єкта, що вимірюється.

Оскільки необхідно враховувати разом зі ступенем випромінювання ε об'єкта і відбите випромінювання навколишнього середовища на поверхню об'єкта T_{amb} і власне випромінювання інфрачервоного термометра T_p (C - специфічна для пристрою постійна), формула змінюється наступним чином:

$$U = C \cdot \left(\varepsilon \cdot T_{jbj}^4 + (1-\varepsilon) T_{amb}^4 - T_p^4\right), \quad (2)$$

де C — специфічна стала для окремого пристрою, що залежить від оптичної системи фокусування та поглинаючого матеріалу;

ε – ступінь випромінювання об'єкта, що залежить від матеріалу об'єкту, температура якого вимірюється;

T_{obj} – абсолютна температура об'єкта, що вимірюється;

T_{amb} – абсолютна температура зовнішнього середовища;

(1- ε) T_{amb} – відбите випромінювання зовнішнього середовища;

T_p – абсолютна температура корпусу датчика пірометра.

До того ж, інфрачервоні термометри працюють не в загальному спектрі випромінювання. Показник ступеня n залежить від довжини хвилі. Показник n для довжин хвиль від 5 до 16 мкм знаходиться в діапазоні 7...2:

$$U = C \cdot \left(\varepsilon \cdot T_{obj}^n + (1-\varepsilon) T_{amb}^n - T_p^n\right) . \quad (3)$$

Температура об'єкта розраховується за допомогою перестановки останньої формули. Результати розрахунків для всіх зустрічаються значень температури в вигляді сімейства кривих зберігаються в пам'яті постійній пам'яті інфрачервоного термометра:

$$T_{obj} = \sqrt[n]{\frac{U - C \cdot T_{amb}^n + C \cdot \varepsilon T_{amb}^n + C \cdot T_p^n}{C\varepsilon}} . \quad (4)$$

Інфрачервоні термометри отримують досить сигналу для вимірювання температури. Виходячи з рівнянь видно, що поряд з областю довжини хвилі (спектр випромінювання) важливе значення має і відбите випромінювання навколишнього середовища і коефіцієнт випромінювання, коли потрібно точно визначити температуру [15].

Аналізуючи наведені співвідношення, можна зробити висновок, що точність визначення температури тіла залежить від:

- поглинаючого матеріалу приладу;
- оптичної системи приладу;
- температури навколишнього середовища;
- температури корпусу пірометру.

Однак, враховуючи, що ми маємо справу з вимірюванням одного й того самого матеріалу (шкіри людини), точність не буде залежить від ступеню випромінювання об'єкта (ε).

Отже, пропонується під час проектування безконтактних ІЧ приладів термометрії тіла людини:

1) використовувати поглинаючі матеріали з піковим поглинанням у спектрі, що відповідає найбільшій інтенсивності випромінювання тіла людини (16 мкм);

2) використовувати якісну оптичну систему з матеріалів, що мають максимальну пропускну спосібність у спектрі випромінювання тіла людини;

3) при проведенні калібрування та подальших вимірюваннях додатково вимірювати температури навколишнього середовища та температуру корпусу пірометру з внесенням відповідних корегувань в показання приладу вимірювання температури тіла.

Аналіз параметрів інфрачервоних вимірювачів температури тіла

Наступним етапом виявлення шляхів підвищення точності безконтактної ІЧ термометрії було проведено аналіз конструктивних особливостей пірометрів (табл. 2).

Основними показниками ручних пірометрів є:

- точність вимірювання;
- кут огляду (FOV);
- наявність контактного датчика (термопари) для калібрування;
- наявність лазерного цілевказувача;
- можливість запису фото / відео процесу вимірювання;
- наявність і спосіб передачі даних на ПК;
- реєстрація та утримання даних на дисплеї.

Таблиця 2. Основні показники безконтактних систем вимірювання температури

Основні параметри ручних пірометрів	Основні параметри автоматизованих систем термометрії тіла
точність вимірювання	точність вимірювання
кут огляду (FOV)	частина тіла, для якої проводиться вимір
наявність контактного датчика (термопари) для калібрування	наявність, тип та точність датчиків відстані до шкіри при вимірюванні
наявність лазерного цілевказувача	габаритні розміри
можливість запису фото / відео процесу вимірювання	можливість запису фото / відео процесу вимірювання
наявність і спосіб передачі даних на ПК	спосіб передачі даних на ПК, додаткові інтерфейси передачі даних
реєстрація та утримання даних на дисплеї	наявність звукової, світлової індикації, дисплея в корпусі
дистанція вимірювання	можливість управління турнікетами і іншими силовими пристроями для пропуску на територію

Точність вимірювання ручних пірометрів температури тіла коливається, як правило, від 0,02°С до 0,2°С. Однак, слід зазначити, що це лише заявлений крок поділки приладу, а реальна точність з урахуванням дозвільних параметрів первинного перетворювача (інфрачервоного приймача та АЦП) коливається в межах 0,1-0,5°С в залежності від якості виконання оптичної системи фокусування інфрачервоного випромінювання і розрядності АЦП.

Кут огляду оптичної системи фокусування (FOV - Field Of View) миттєве поле зору - стягуваний кут, в межах якого вимірювальний прилад збирає променисту енергію на один чутливий елемент, або кутова проекція чутливого елемента на поверхню об'єкта вимірювання. Даний параметр грає роль для можливої дальності проведення вимірювань. При великому куті отримується випромінювання фокусується з більшої площі, а отже, можливе захоплення випромінювання не тільки з частини тіла, а й з навколишніх об'єктів, тому вимірювальна пляма при цьому зростає. Порівняння охоплення частини тіла, що сканується датчиком з маленьким і великим кутом стягнення (рис. 3). Отже для гарантування, що вимірювання буде охоплювати лише шкіру людини, а не оточуюче середовище для вимірювання температури тіла людини краще використовувати датчики з якомога меншим кутом фокусування [16].

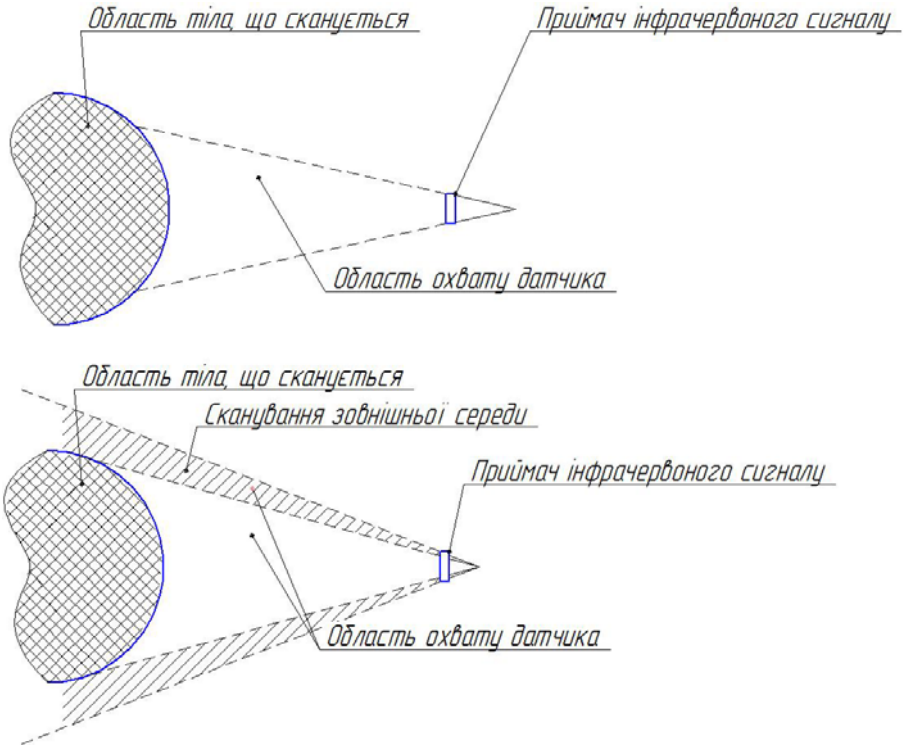

Рисунок 3. Порівняння датчиків з різним FOV

Інші технічні (але не конструктивні) показники не впливатимуть на точність вимірювання, а впливають лише на зручність користування.

До конструктивних параметрів, що впливатимуть на точність вимірювання температури, можна віднести:

- якість оптичної системи фокусування;
- якість та тип матеріалу детектора ІЧ випромінювача;
- якість попереднього підсилювача;
- параметри АЦП (швидкість перетворення, розрядність, фільтрація шумів).

На якість оптичної системи, в першу чергу, буде впливати матеріал, з якого виготовлено лінзу.

Основними оптичними та іншими фізико-механічними параметрами і характеристиками матеріалів лінз є:

- спектральне пропускання або відбивання;
- показник заломлення;
- дисперсія;
- зміна коефіцієнта пропускання і показника заломлення при зміні температури;
- щільність;
- твердість;
- теплопровідність;
- коефіцієнт термічного розширення;
- теплоємність;
- модуль пружності;
- температури розм'якшення і плавлення;
- стійкість до впливу різних середовищ.

До матеріалів, що пропускають у спектрі випромінювання тіла людини (пікове значення 16 мкм) відносяться наступні матеріали [17]:

- германій (полоса пропускання 1,8…17 мкм);
- телурид кадмію «Іртран-6» (полоса пропускання 1,5…26 мкм);
- селенід цинку «Іртран-4» (полоса пропускання 0,55…21 мкм).

Інші матеріали хоча й пропускають в ІЧ спектрі, однак або їх смуга пропускання або зовсім не попадає в пікову смугу випромінювання тіла людини, або знаходяться на границі цієї зони.

Також важливим у нашому випадку буде найбільш вузька смуга пропускання, що максимально співпадає зі смугою випромінювання тіла людини, щоб відфільтрувати оптично випромінювання від інших матеріалів. Тому найкращим матеріалом для створення оптичної системи датчиків ІЧ термометрів є германій (Ge).

Вплив на точність буде здійснювати також площа лінзи. На прикладі астрономічної техніки та зокрема телескопів - не важливо, чи встановлені вони на орбіті або на земній поверхні. Чим більша площа дзеркала, тим слабший сигнал можна отримає з глибин космосу. З пірометрами картина та сама. Від площі лінзи залежить потужність прийнятого теплового потоку. Це не визначальний показник, але також робить вплив на точність.

Тому потрібно знайти баланс між діаметром, якістю виконання оптики, матеріалом, і точністю установки лінз.

Використання методу багатократного вимірювання напруги отриманої АЦП з матеріалу, що поглинає ІЧ випромінювання та відповідно АЦП з більшою швидкістю перетворення дозволить зменшити випадкові похибки вимірювань (шляхом статистичної оцінки результату та викидання грубих похибок). А використання АЦП з більшою розрядністю надасть можливість більш точно проводити сам процес перетворення кожного окремого вимірювання.

Крім параметрів самого вимірювального приладу на точність вимірювання впливають зовнішні фактори, основні з них:

- частина тіла людини, що підлягає вимірюванню;
- хроматична аберація;
- оптичні завади (пил, дим та інші дрібнодисперсні речовини) на шляху між тілом та ІЧ датчиком [18, 19].

По-перше, на точність буде впливати те, температуру якої частини тіла вимірюють, оскільки нормальна температура різних частин тіла відрізняється з причини різного рівня кровообігу (табл. 3). З таблиці видно, що вимірювання температури на лобі краще взагалі не вимірювати, а розкид температур для різних частин тіла буди різним, тому треба це враховувати при оцінюванні виходу виміряної температури за межі границь температур здоровою людини.

Таблиця 3. Межові значення температур для різних частин тіла

Спосіб вимірювання температури	Мінімальна T, °C	Максимальна T, °C
Ректально	36.2	37.7
Вагинально	36.0	37.5
Орально (щоковий)	35.5	37.1
Орально (під язиком)	35.7	37.3
Аксилярно (під мишкою)	35.2	36.7
Вухо	35.8	37.1
Лоб	-*	-*

* Залежить від температури навколишнього середовища

Розглянемо вплив хроматичної аберації. Дистанційний метод вимірювання температури на відміну від контактного способу, заснований на перетворенні потужності інфрачервоного випромінювання (теплового потоку). Якщо матеріал оптики по-різному пропускає промені в залежності від довжини хвилі, то відбувається "розмиття".

Пил, дим, частинки солей, пилок рослин, бактерій, мікроби, краплі води, кристали льоду і інші частинки відіграють велику роль при розсіюванні випромінювання, а також є центрами конденсації водяної пари при утворенні туманів і хмар (рис. 4).

Рисунок 4. Вимірювання через перешкоди

Система для отримання статистичної інформації для виявлення факторів впливу та аналіз результатів

Для отримання статистичної інформації про вплив перерахованих факторів на точність вимірювання було проведено розробку апаратної частини інфрачервоного безконтактного термометра з написанням програмного забезпечення реєстрації проведених вимірювань при різних умовах та співставлення отриманих даних з контактним методом вимірювання з використанням ртутного градусника (оскільки цей метод є найбільш точним, див. табл. 1).

Було запропоновано схему системи, яку наведено на рис. 5.

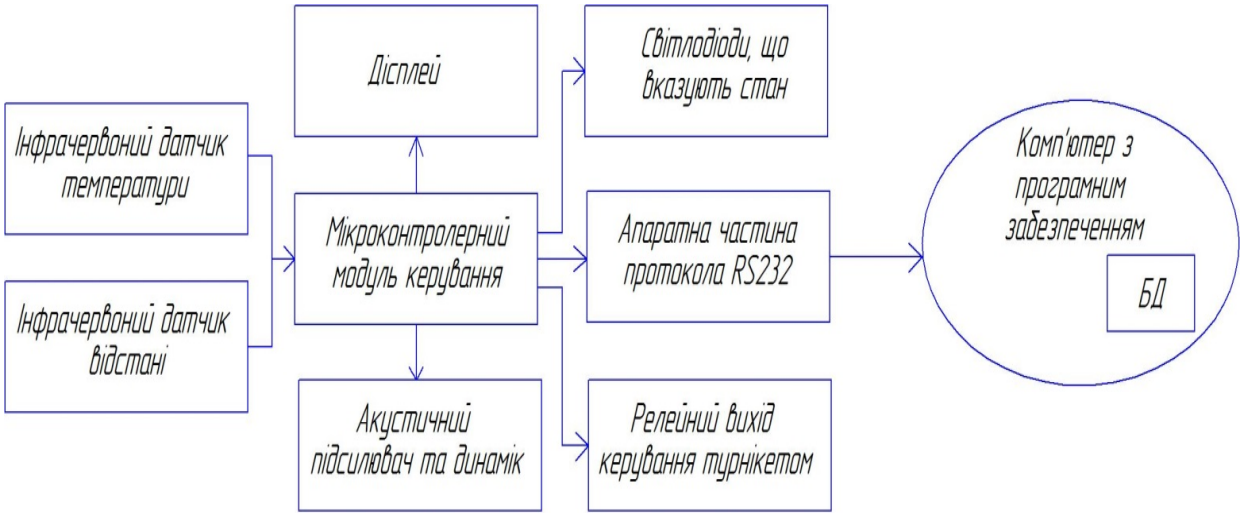

Рисунок 5. Структура розроблюваної системи

Основним елементом системи є інфрачервоний датчик температури, що проводить вимірювання та передає дані на мікроконтролерний модуль керування. Також на модуль керування надходить сигнал з датчика відстані для оцінювання впливу відстані вимірювання на точність.

Програма мікроконтролера проводить перерахунок отриманої інформації в залежності від виставле-

них коефіцієнтів та передає отриману інформацію на комп'ютер.

Комп'ютерна програма зберігає отримані дані в базі даних та відображає у таблиці. В залежності від значення температури запис підсвічується різним кольором та у випадку перевищення дозволеної температур тіла додатково сповіщує користувача.

До мікроконтролерного модулю також приєднаний дисплей, котрий відображає виміряні параметри, що зручно для того, хто вимірює свою температуру тіла. Додатково реалізовані червоний та зелений світлодіоди, що показують, знаходиться температура в нормі чи перевищена.

Для інформування користувача про закінчення процесу вимірювання та для сповіщення про перевищення допустимої температури до мікроконтролерного модуля додатково приєднаний динамік через акустичний підсилювач.

У якості температурного датчика було обрано датчик MLX90614ESF-DCI, оскільки від має максимальну точність серед датчиків, представлених на ринку, та невеликий кут огляду, що дає можливість фокусуватися на об'єкті вимірювання навіть на відстані до 2 м (рис. 6).

Рисунок 6. Інфрачервоний датчик температури MLX90614ESF-DCI

В якості датчика відстані було обрано лазерний датчик GY-530 на VL53L0X, оскільки він має невеликі розміри, достатню точність та передає дані по стандартній шині I^2C.

Експериментальний зразок пристрою було розроблено, виготовлено та протестовано. Вигляд друкованого вузла модуля (плати та елементів) наведено на рис. 7.

Корпус у зборі представлено на рис. 8.

Програмне забезпечення, що реєструвало проведені вимірювання наведене на рис.9.

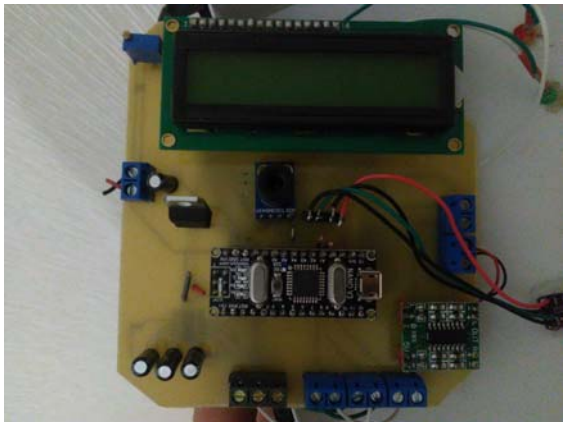

Рисунок 7. Конструкція плати розробленого модуля зі встановленими елементами

Рисунок 8. Апаратна частина системи в корпусі

Дослідження проводилось на одному з підприємств м. Дніпро з кількістю робітників більше 200 людей. Контроль проводився на протязі 3 місяців (з квітня по липень 2020 року). Загалом було проведено більше 10 тис. вимірювань.

Контроль правильності вимірювання проводився порівнянням з контактним вимірюванням ртутним градусником.

Аналіз отриманих статистичних даних показав вплив на точність вимірювання температури зовнішнього середовища. Оскільки було використано датчик з вмонтованою термопарою, а система знаходилась в приміщенні, була можливість одночасного вимірювання температури зовнішнього середовища, а температуру корпусу можна вважати рівною температурі датчика.

На рис. 10 наведено розподіл помилки вимірювань від різниці між температурою навколишнього та температурою тіла людини. Як видно з рисунку, при значній різниці між температурами спостерігається похибка зі знаком, що співпадає зі знаком різниці температур. Додаткові дослідження дозволять провести регресивний аналіз залежності та виявлення математичної залежності для включення її в системи безконтактної ІЧ термометрії.

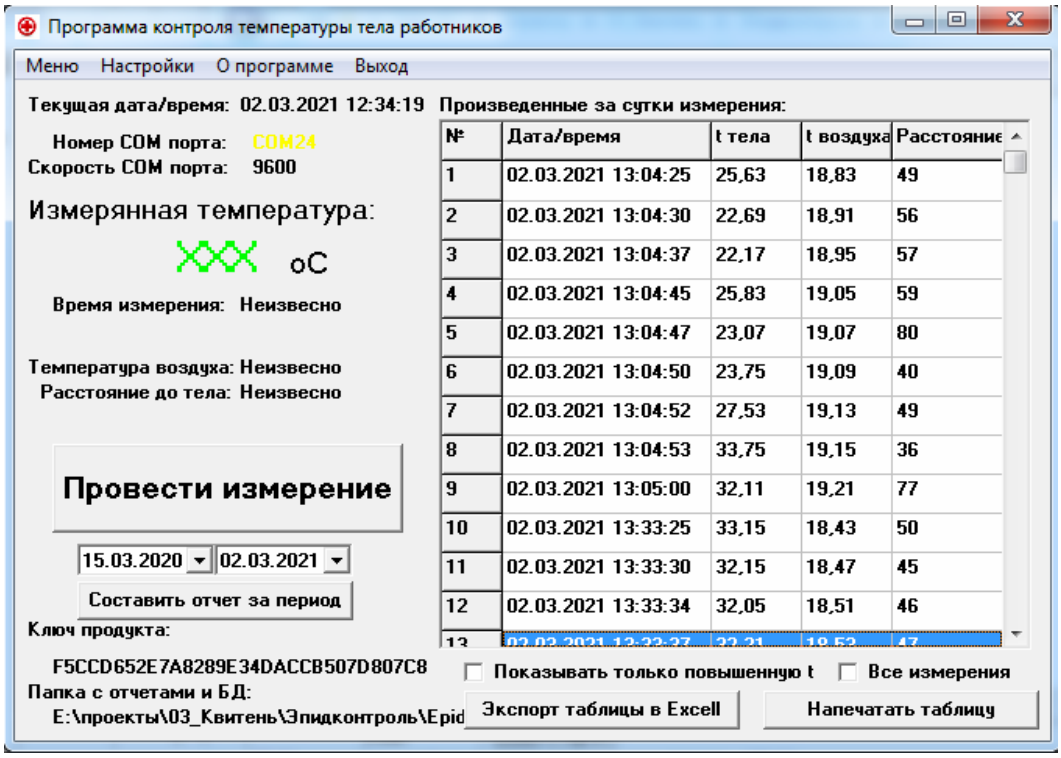

Рисунок 9. Основне вікно програми системи безконтактного вимірювання температури

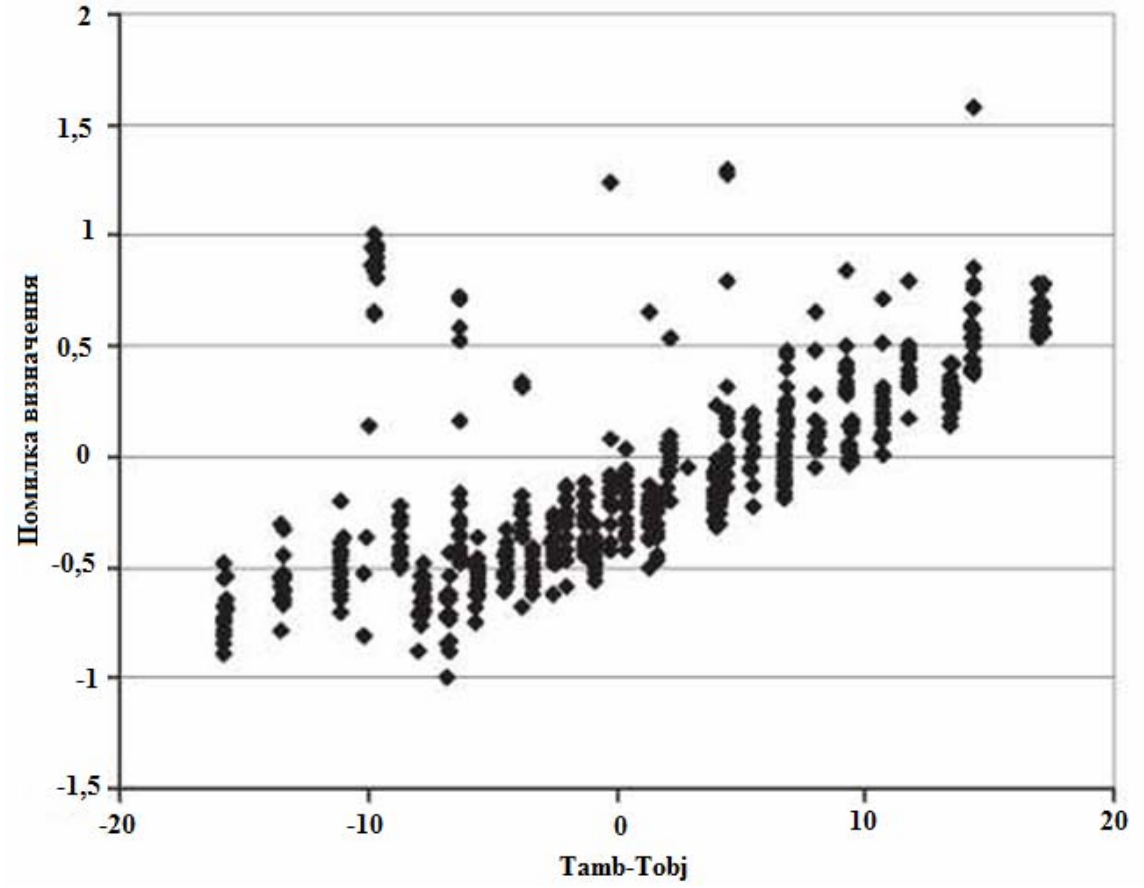

Рисунок 10. Вплив різниці температури

V. ВИСНОВКИ

Проведений аналіз факторів, що впливають на точність вимірювань температури безконтактним методом дає можливість зробити наступні висновки.

Загалом точність вимірювання методом безконтактної ІЧ термометрії можна підвищити:

1) використанням поглинаючих матеріали з піковим поглинанням у спектрі, що відповідає найбільшій інтенсивності випромінювання тіла людини (16 мкм);

2) використанням якісної оптичної системи з матеріалів, що мають максимальну пропускну спосібність у спектрі випромінювання тіла людини (використання добре оброблених лінз з германію для максимального співпадання смуги пропускання зі смугою випромінювання тіла людини);

3) при проведенні калібрування та подальших вимірюваннях додатково вимірювати температури навколишнього середовища та температуру корпусу пірометру з внесенням відповідних корегувань в показання приладу вимірювання температури тіла;

4) проведенням багатократних вимірювань з використанням швидкісного багато розрядного АЦП з гарною фільтрацію вхідного сигналу;

5) використанням якісного попереднього підсилювача сигналу від поглинаючого матеріалу до АЦП;

6) врахуванням частини тіла, що підлягає вимірюванню;

7) використанням оптичних систем з мінімальним кутом огляду для захисту від впливу випромінювання зовнішнього середовища;

8) знаходженням оптимального балансу між діаметром, якістю виконання оптики, матеріалом, і точністю установки лінз;

9) Врахуванням впливу запиленості, задимленості, вологості повітря між тілом людини та вимірювальним приладом

Матеріали, що наведені в даній статті, дозволяють з високою ймовірністю стверджувати, що після впровадження запропонованих методів збільшення точності вимірювання температури тіла безконтактним ІЧ методом можна буде гарантувати знаходження температури тіла людини в межах здорового стану (тобто не гірше, ніж при вимірюваннях контактними методами).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Повный, А. Как устроены и работают бесконтактные термометры / А. Повный [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://electrik.info/device/1096-kak-ustroeny-i-rabotayut-beskontaktnye-termometry.html. (дата звернення: 18.12.2020).

[2] Дуть или не дуть, и другие опыты с инфракрасным термометром [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://habr.com/ru/company/dadget/blog/380695/ (дата звернення: 18.12.2020).

[3] Бесконтактные исследования температуры тела во время пандемии [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://evercare.ru/news/beskontaktnye-issledovaniya-temperatury-tela-vo-vremya-pandemii. (дата звернення: 18.12.2020).

[4] Рассел Мостафа Махмуд. Исследования и разработка метода и оптико-электронного устройства. Дис. … канд. техн. наук, Специальность 05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы. – Москва, 2012.

[5] Способ дистанционного измерения температурного поля. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://findpatent.ru/patent/242/2424496.html (дата звернення: 18.12.2020).

[6] Марукович, Е. И. Бесконтактная термометрия / Е. И. Марукович, А. П. Марков, С. С. Сергеев; под общ. ред. Е. И. Маруковича [Текст]. - Минск: Беларуская навука, 2014. - 252 с.

[7] Ценин, В. Точность дистанционного определения температуры тела человека по результатам измерения температуры лба и запястья. [Електронний ресурс] – Режим доступу: // URL: https://rubezh.ru/blog/36861-tochnost-distanczionnogo-opredeleniya-temperaturyi-tela-chelovek. (дата звернення: 18.12.2020).

[8] Аппаратно-программный комплекс для дистанционногоизмерения и контроля температуры человеческого тела [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.evs.ru/kat_podr.php?kat=ippact&nkat_id=9 (дата звернення: 18.12.2020).

[9] Сагайдачный, А.А. Методы тепловизионного анализа пространственно-временной динамики температуры тела человека и их использование в диагностике. / А.А. Сагайдачный [Електронний ресурс] – Режим доступу: // URL: http://earthpapers.net/preview/333489/a?#?page=1 (дата звернення: 18.12.2020).

[10] Радиотермометрия [Електронний ресурс] – Режим доступу: // URL: https://www.fdoctor.ru/diagnostika/radiotermometriya. (дата звернення: 18.12.2020).

[11] Измерения глубинной температуры тела человека методом пассивной акустической термометрии [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://cyberleninka.ru/article/n/izmereniya-glubinnoy-temperatury-tela-cheloveka-metodom-passivnoy-akusticheskoy-termometrii/viewer (дата звернення: 18.12.2020).

[12] Шаракшанэ, А.С. Восстановление параметров меняющегося во времени пространственного температурного распределения модельных биологических объектов методом акустотермографии./

А.С. Шаракшанэ [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.cplire.ru/rus/dissertations/Sharakshane/dissertation.pdf (дата звернення: 18.12.2020).

[13] Glockmann, W. Noncontact Temperature Measurement Theory and Application // Walter Glockmann [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.omega.co.uk/temperature/z/noncontacttm.html. (дата звернення: 18.12.2020).

[14] Types of Radiation Thermometers [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.omega.co.uk/literature/transactions/volume1/thermometers2.html. (дата звернення: 18.12.2020).

[15] Chrzanowski. K. Non-contact thermometry. Measurement Errors / K. Chrzanowski.// SPIE Polish Chapter, Warsaw, 2001. – 140 p.

[16] Ring, F. Pioneering progress in infrared imaging in medicine / F. Ring // Quantitative Infrared Thermography Journal, vol. 11, no. 1, 2014. - P. 57-65.

[17] Коленко, Е.А. Технология лабораторного эксперимента: Справочник / Е.А. Коленко - СПб.: Политехника, 1994, 205 с.

[18] Dell'Isola, G.B. Noncontact Body Temperature Measurement: Uncertainty Evaluation and Screening Decision Rule to Prevent the Spread of COVID-19 / G.B. Dell'Isola, E. Cosentini, L. Canale, G. Ficco, M. Dell'Isola, // Sensors vol. 21, 2021 – P. 346. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/2/346/pdf. (дата звернення: 10.01.2021).

[19] Basic principles of Non-Contact Temperature Measurement [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://infrarougekelvin.com/wp-content/uploads/2016/06/4A-IR-Basics-2.pdf (дата звернення: 18.12.2020).

Стаття надійшла до редакції 17.02.2021

ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА БЕСКОНТАКТНЫМИ ИК ТЕРМОМЕТРАМИ

ФУРМАНОВА Н.И. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий электронных средств Национального университета «Запорожская политехника» Запорожье, Украина, e-mail: nfurmanova@gmail.com;

ФАРАФОНОВ А.Ю. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий электронных средств Национального университета «Запорожская политехника» Запорожье, Украина, e-mail: farafon@zntu.edu.ua;

МАЛЫЙ А.Ю. канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий электронных средств Национального университета «Запорожская политехника» Запорожье, Украина, e-mail: docsasha2@gmail.com;

ПИРОЖЕНКО А.А. аспирант кафедры информационных технологий электронных средств Национального университета «Запорожская политехника» Запорожье, Украина

Цель работы: *проанализировать существующие подходы измерения температуры тела человека, предложить подходы для повышения точности измерения.*

Методы исследования: *аналитический, экспериментальный.*

Полученные результаты. *В статье рассмотрено подходы к повышению точности измерения температуры тела бесконтактными инфракрасными термометрами. Проанализированы параметры инфракрасных измерителей температуры. Предложен состав системы для сбора статистической информации влияния факторов окружающей среды на точность измерений. Предложено программное обеспечение для проведения исследований. Приведены статистические данные измерений. Указаны пути повышения точности измерений бесконтактными инфракрасными термометрами. Предложено математическое и физическое обеспечение бесконтактного измерения температуры, проведен анализ параметров инфракрасных измерителей температуры тела, разработана система для получения статистической информации для выявления факторов влияния, проведен анализ результатов.*

Научная новизна. *Предложена уточненная формула для определения температуры тела, содержит следующие параметры: специфическая постоянная для отдельного устройства, зависящая от оптической системы фокусирования и поглощающего материала; степень излучения объекта, зависящая от материала объекта, температура которого измеряется; абсолютная температура анализируемого объекта; абсолютная*

температура внешней среды; отраженное излучение внешней среды; абсолютная температура корпуса датчика пирометра.

Практическая ценность. *В работе предложены рекомендации, способные в значительной степени повысить точность измерений при проектировании систем, содержащих инфракрасные термометры.*

Ключевые слова: *термометрия; инфракрасный; точность; статистические измерения; погрешность.*

APPROACHES TO IMPROVE THE ACCURACY OF MEASUREMENT OF HUMAN BODY TEMPERATURE BY CONTACTLESS IR THERMOMETERS

FURMANOVA N.I. Ph.D, Associate professor, Associate professor at the department "Informational technologies of electronic devices", Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: nfurmanova@gmail.com;

FARAFONOV O.YU. Ph.D, Associate professor, Associate professor at the department "Informational technologies of electronic devices", Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: farafon@zntu.edu.ua;

MALIJ O.YU. Ph.D, Associate professor at the department "Informational technologies of electronic devices", Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: docsasha2@gmail.com;

PIROZHENKO O.O. Postgraduate student at the department "Informational technologies of electronic devices", Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine

Purpose: *analyze existing approaches to measuring human body temperature, propose approaches to improve measurement accuracy.*

Methodology. *analytical, experimental.*

Findings. *The article considers approaches to improving the accuracy of measuring body temperature with non-contact infrared thermometers. The parameters of infrared temperature meters are analyzed. The composition of the system for collecting statistical information on the influence of environmental factors on the accuracy of measurements is proposed. Research software is offered. Measurement statistics are given. Ways to increase the accuracy of measurements with non-contact infrared thermometers are indicated. Mathematical and physical support of non-contact temperature measurement is offered, the analysis of parameters of infrared body temperature meters is carried out, the system for receiving the statistical information for revealing of factors of influence is developed, the analysis of results is carried out.*

Originality. *An updated formula for determining body temperature is proposed, which contains the following parameters: specific constant for a particular device, which depends on the optical focusing system and the absorbing material; the degree of radiation of the object, which depends on the material of the object whose temperature is measured; the absolute temperature of the object being measured; absolute ambient temperature; reflected radiation from the environment; absolute temperature of the pyrometer sensor housing..*

Practical value. *The paper offers recommendations that can significantly increase the accuracy of measurements in the design of systems containing infrared thermometers.*

Keywords: thermometry; infra-red; precision; statistical measurements; error

REFERENCES

[1] Povnyj, A. Kak ustroeny i rabotajut beskontaktnye termometry / A. Povnyj [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://electrik.info/device/1096-kak-ustroeny-i-rabotayut-beskontaktnye-termometry.html. (дата звернення: 18.12.2020).

[2] Dut' ili ne dut', i drugie opyty s infrakrasnym termometrom [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://habr.com/ru/company/dadget/blog/380695/ (дата звернення: 18.12.2020).

[3] Beskontaktnye issledovanija temperatury tela vo vremja pandemii [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://evercare.ru/news/beskontaktnye-issledovaniya-temperatury-tela-vo-vremya-pandemii. (дата звернення: 18.12.2020).

[4] Rassel Mostafa Mahmud. (2012). Issledovanija i razrabotka metoda i optiko-jelektronnogo ustrojstva distancionnogo izmerenija temperatury. Dis. … kand. tehn. nauk Special'nost' 05.11.07 - Opticheskie i optiko-jelektronnye pribory i kompleksy. Moskva.

[5] Sposob distancionnogo izmerenija temperaturnogo polja. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://findpatent.ru/patent/242/2424496.html (дата звернення: 18.12.2020).

[6] Marukovich, E. I., Markov, A. P., Sergeev, S. S.; (2014). Beskontaktnaja termometrija. [Tekst]. Minsk: Belaruskaja navuka, 252 s.

[7] Cenin, V. Tochnost' distancionnogo opredelenija temperatury tela cheloveka po rezul'tatam izmerenija temperatury lba i zapjast'ja. URL: https://ru-bezh.ru/blog/36861-tochnost-distanczionnogo-opredeleniya-temperaturyi-tela-chelovek. (data zvernennja: 18.12.2020

[8] Apparatno-programmnyj kompleks dlja distancion-nogoizmerenija i kontrolja temperatury chelove-cheskogo tela [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.evs.ru/kat_podr.php?kat=ippact&nkat_id=9 (дата звернення: 18.12.2020).

[9] Sagajdachnyj, A.A. Metody teplovizionnogo analiza prostranstvenno-vremennoj dinamiki temperatury tela cheloveka i ih ispol'zovanie v diagnostike. / A.A. Sagajdachnyj [Електронний ресурс] – Режим доступу: // URL: http://earthpapers.net/preview/333489/a?#?page=1 (дата звернення: 18.12.2020).

[10] Radiotermometrija [Електронний ресурс] – Режим доступу: // URL: https://www.fdoctor.ru/diagnostika/radiotermometriya. (дата звернення: 18.12.2020).

[11] Izmerenija glubinnoj temperatury tela cheloveka metodom passivnoj akusticheskoj termometrii [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://cyberleninka.ru/article/n/izmereniya-glubinnoy-temperatury-tela-cheloveka-metodom-passivnoy-akusticheskoy-termometrii/viewer (дата звернення: 18.12.2020).

[12] Sharakshanje, A.S. Vosstanovlenie parametrov menjajushhegosja vo vremeni prostranstvennogo temperaturnogo raspredelenija model'nyh biologicheskih ob#ektov metodom akustotermografii. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.cplire.ru/rus/dissertations/Sharakshane/dissertation.pdf (дата звернення: 18.12.2020).

[13] Glockmann, W. Noncontact Temperature Measurement Theory and Application // Walter Glockmann [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.omega.co.uk/temperature/z/noncontacttm.html. (дата звернення: 18.12.2020).

[14] Types of Radiation Thermometers [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.omega.co.uk/literature/transactions/volume1/thermometers2.html. (дата звернення: 18.12.2020).

[15] Chrzanowski. K. (2001). Non-contact thermometry. Measurement Errors. SPIE Polish Chapter, Warsaw, 140 p.

[16] Ring, F. (2014). Pioneering progress in infrared imaging in medicine. // Quantitative Infrared Thermography Journal, vol. 11, no. 1, 57-65.

[17] Kolenko, E.A. (1994). Tehnologija laboratornogo jeksperimenta: Spravochnik. SPb.: Politehnika, 205.

[18] Dell'Isola, G.B. Noncontact Body Temperature Measurement: Uncertainty Evaluation and Screening Decision Rule to Prevent the Spread of COVID-19 / G.B. Dell'Isola, E. Cosentini, L. Canale, G. Ficco, M. Dell'Isola, // Sensors vol. 21, 2021 – P. 346. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/2/346/pdf. (дата звернення: 10.01.2021).

[19] Basic principles of Non-Contact Temperature Measurement [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://infrarougekelvin.com/wp-content/uploads/2016/06/4A-IR-Basics-2.pdf (дата звернення: 18.12.2020).