

СИСТЕМА НЕІНВАЗИВНОГО КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ
БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Запропоновано спосіб сканування поверхні біологічного об'єкта за допомогою мікропроцесорної системи на основі пірометра, що дозволяє побудувати форму кривої спектрального розподілу для щільності потужності електромагнітного випромінювання біологічного об'єкта в інфрачервоному діапазоні, а також реалізувати неінвазивне вимірювання температури серця в умовах штучного кровообігу. Отриманий за допомогою такої системи розподіл температури в міокарді дає додаткову діагностичну інформацію про наповнення судин серця кров'ю, а також інформацію про ступінь ішемії судин.

Ключові слова: температура серця, пірометр, мікропроцесорна система, штучний кровообіг.

Вступ

Методи неінвазивного вимірювання температури мають широке застосування в медичній практиці. Ці методи ефективно застосовують під час хірургічних операцій, у яких прямий контакт вимірювального обладнання з пацієнтом неможливий або небажаний. Серед методів неінвазивного вимірювання температури можна виділити метод вимірювання інтенсивності теплового випромінювання з поверхні тканин. Інформативність цього методу залежить від чутливості елементів на оптичному вході та алгоритму обробки даних. Для неінвазивного вимірювання температури невеликих об'єктів доцільне використання пірометра спектрального відношення [1]. Це зумовлено тим фактом, що показання цих пірометрів не залежать від відстані до об'єкта, а також від поглинання випромінювання в проміжному середовищі між об'єктом і пірометром. Такі пірометри спектрального відношення мають однакову випромінювальну здатність на всіх довжинах хвиль у спектрі вимірювання [2]. Ця особливість дозволяє використовувати пірометри для вимірювання температури на поверхні біологічних об'єктів, а також у кардіохірургії для вимірювання температури серця в умовах штучного кровообігу.

Метою роботи є розроблення методу неінвазивного вимірювання температури серця в умовах штучного кровообігу за допомогою пірометрів спектрального відношення для отримання розподілу температури на поверхні міокарду.

Вплив зовнішніх факторів на точність вимірювання температури

Інтенсивність падаючого інфрачервоного випромінювання на прийомний майданчик пірометра сильно залежить від впливу змінних зовнішніх факторів. В основному це параметри середовища поширення випромінювання [3]. Величина випромінювальної здатності ϵ залежить від довжини хвилі випромінювання λ , температури T й узагальненого параметра стану поверхні міокарда — шорсткості, наявності жирових відкладень тощо. У табл. 1 подані значення ϵ для деяких матеріалів [4], застосовуваних при штучному кровообігу.

Таблиця 1

Випромінювальна здатність матеріалів

Матеріал	Температура, °С	ϵ
Пластик (медичний)	20	0,94
Гума м'яка	23	0,94
Скло	40	0,94
Срібло	20	0,02
Залізо оброблене	20	0,24
Шкіра людська	36	0,98
Лід гладкий	0	0,97
Лід нерівний	0	0,99
Кров	36	0,95
Вода	38	0,67

За незмінних умов неоднорідний поверхневий розподіл температури тіла людини зумовлюється процесом теплообміну за рахунок обмінних процесів в організмі. У процесі теплообміну кров віддає і акумулює тепло. Кров акумулює тепло переважно в

серці, печінці та нирках за рахунок обмінних процесів у цих внутрішніх органах. Накопичене кров'ю тепло віддається в шкірі та підшкірних шарах кровоносними судинами і капілярами [5].

Оскільки кров і шкіра людини має відносно високий коефіцієнт випромінювання $\varepsilon_\lambda \geq 0,95$, зміни температури цих біологічних об'єктів приводять до значної зміни потужності інфрачервоного випромінювання тканинами.

Спектральні залежності випромінювальної здатності $\varepsilon = f(\lambda)$ для деяких матеріалів (Fe, Ni, Cu, Ag, Co) показано на рис. 1. Усі залежності $\varepsilon = f(\lambda)$ мають однотипний характер — з ростом довжини хвилі спектральна випромінювальна здатність ε_λ зменшується.

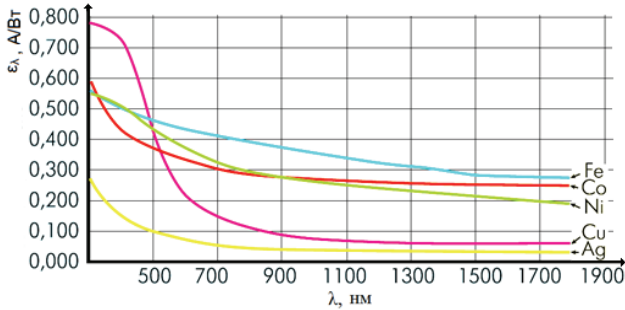


Рис. 1. Спектральні залежності випромінювальної здатності ε_λ від довжини хвилі λ

Тому температуру біологічного об'єкта можна визначити за реєстрацією положення максимуму спектра випромінювальної здатності.

Низький коефіцієнт випромінювання хірургічних інструментів з обробленого металу або зі спеціальним покриттям забезпечує мінімальний їх вплив на визначення температури тканин міокарда і крові. Це дозволяє з високою достовірністю реєструвати температуру серця, а також статичний розподіл температури

у міокарді. Аналіз залежності розподілу температури в міокарді надає інформацію про наповнення судин кров'ю, а також про судинні розлади та ішемії, ступінь охолодження і прогріву тканин серця в умовах штучного кровообігу.

Оцінка інструментальної похибки вимірювання температури

Для контролю температури в умовах штучного кровообігу доцільне використання пірометрів спектрального відношення, наприклад пірометра Optris MS Plus [6]. Ці пірометри показують температуру міокарда T_m , за якої сірий об'єкт на всіх довжинах хвиль λ має такий самий відносний спектральний розподіл потужності електромагнітного випромінювання, що й досліджуваний об'єкт із дійсною температурою T_i .

Якщо випромінювальна здатність ε залежить від довжини хвилі, то зв'язок між дійсною і вимірюваною температурою визначається виразом [7]

$$\frac{1}{T_i} = \frac{1}{T_m} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{C_2 (\lambda_2 - \lambda_1)} \ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}, \quad (1)$$

де $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ — друга константа випромінювання; T_m, K — вимірювана температура міокарда; T_i, K — дійсна температура міокарда; $\varepsilon_{\lambda_1}, \varepsilon_{\lambda_2}$ — коефіцієнти випромінювальної здатності на довжинах хвиль λ_1 і λ_2 .

Таким чином, якщо пірометр Optris MS Plus показує температуру на поверхні тканин $T_m = 298 \text{ K}$ (25°C), а випромінювальна здатність тканин міокарда $\varepsilon = 0,95$ на довжині хвилі $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$, то обчислена температура міокарда становить:

$$T_i = \frac{1}{(1/298) + (\log 0,95/9613)} = 298,2 \text{ K}. \quad (2)$$

Отже, за похибки вимірювання температури не більше $\pm 0,7^\circ \text{C}$ і за низьких температур $T_m = 10 - 40^\circ \text{C}$ в умовах штучного кровообігу вимірювану пірометром температуру міокарда можна вважати дійсною $T_i \approx T_m$.

Крім того, у разі вимірювання пірометром Optris MS Plus температури на відстані до об'єкта $l = 14 \text{ см}$, діаметр зони вимірювання не повинен перевищувати 13 мм . Тому, щоб забезпечити високу точність вимірювання і візуалізації температурного поля серця при вимірюванні температури локальних ділянок міокарда, необхідно забезпечити розмір зони вимірювання не більше $5...9 \text{ см}$ і відстань до об'єкта не більше $14...15 \text{ см}$. Похибку вимірювання температури можна зменшити,

якщо зробити кут візування пірометра Optris MS Plus мінімальним. Це пояснюється тим, що за великого кута візування пірометр буде вимірювати деяку середню температуру, що складається з температури контрольованого об'єкта і температури операційного поля, яке попадає у зону дії пірометра.

Оскільки значення показника випромінювальної здатності міокарда ϵ_λ за сталої температури не змінюється з довжиною хвилі, застосування пірометра спектрального відношення Optris MS Plus не вносить додаткової інструментальної похибки. Характер розподілу температури у міокарді залежить від динаміки зміни температури в часі або, у загальному випадку, від умов проведення гіпотермії та гіпертермії в умовах штучного кровообігу. Температурний рельєф поверхні серця залежить від рівня наповненості тканин кров'ю, від перерозподілу крові у разі зміни просвіту судин, а також від теплових властивостей міокарда (теплопровідності, теплоємності тканин).

Система неінвазивного контролю температури на основі пірометра

Система неінвазивного контролю температури побудована на основі інфрачервоного пірометра Optris MS Plus і мікропроцесора Arduino Uno Rev3 [8]. Система візуального керування мікропроцесором Arduino Uno Rev3 і інфрачервоним пірометром Optris MS Plus реалізована в середовищі розробки проєктів LabView 2010 National Instruments [9]. Середовище розробки LabView 2010 дозволяє використовувати стандартні засоби комунікації з пакету віртуальних інструментів National Instruments VISA і додаткові засоби з пакету VI Package Manager 2016 з інтерфейсом для Arduino, які дозволяють реалізувати керування системою з персонального комп'ютера за допомогою USB інтерфейсу. Блок-схема системи неінвазивного контролю температури, показана на рис. 2.

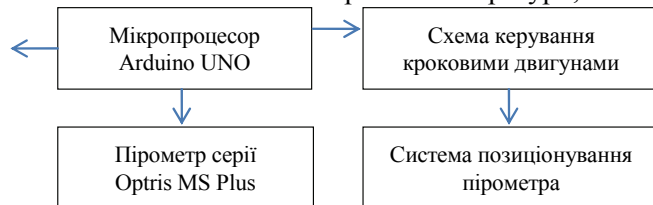


Рис. 2. Блок-схема системи неінвазивного контролю температури

Система включає такі функціональні елементи: мікропроцесор Arduino Uno Rev3, схему керування кроковими двигунами, систему позиціонування на основі крокових двигунів, інфрачервоний пірометр Optris MS Plus. Мікропроцесор Arduino Uno Rev3 програмується у середовищі Arduino Integrated Development Environment мовою C++ і забезпечує автоматичне керування кроковими двигунами та системою позиціонування пірометра. Мікропроцесор Arduino Uno Rev3 підключено до драйверів крокових двигунів ULN2003 за стандартною схемою включення у відповідності зі специфікацією і технічним описом [8]. Систему позиціонування реалізовано на основі трьох крокових двигунів 28BYJ-48 і трьох прецизійних приводних валів THSL-300-8D для 3D принтера та має вигляд, показаний на рис. 3.

Прецизійні приводні вали THSL-300-8D мають довжину 150 мм, крок різьблення 8 мм і діаметр 8 мм. На приводному валу THSL-300-8D закріплена латунна приводна втулка. При позиціонуванні один оберт вала відповідає проходу відстані в 8 мм. Вал виготовлений із загартованої сталі, що забезпечує міцність конструкції та загальну масу трьох приводних валів не більш 315 г. Схему керування кроковими двигунами реалізовано на основі трьох драйверів крокових двигунів ULN2003, яка дозволяє працювати з електроживленням моторів від 5 В и 12 В. Драйвер ULN2003 сполучається зі стандартною бібліотекою Arduino Stepper, і має 4 канали для встановлення режимів роботи для моторів. Для синхронізації обертання крокових двигунів 28BYJ-48 застосовується прив'язка одиничного кроку обертання мотора до вбудованого таймера мікропроцесора Arduino Uno Rev3. Технічні параметри цього двигуна відповідають національному електронному стандарту SJ/T10689-95. Кроковий двигун 28BYJ-48 має напругу живлення 5 В, клас енергобезпеки А і рівень шуму більше 40 дБ, що дозволяє використовувати його в енергозберігаючих системах з малим рівнем шуму. Під час розробки програмного забез-

печення автоматичне керування кроковими двигунами та системою позиціонування пірометра. Мікропроцесор Arduino Uno Rev3 підключено до драйверів крокових двигунів ULN2003 за стандартною схемою включення у відповідності зі специфікацією і технічним описом [8]. Систему позиціонування реалізовано на основі трьох крокових двигунів 28BYJ-48 і трьох прецизійних приводних валів THSL-300-8D для 3D принтера та має вигляд, показаний на рис. 3.

Прецизійні приводні вали THSL-300-8D мають довжину 150 мм, крок різьблення 8 мм і діаметр 8 мм. На приводному валу THSL-300-8D закріплена латунна приводна втулка. При позиціонуванні один оберт вала відповідає проходу відстані в 8 мм. Вал виготовлений із загартованої сталі, що забезпечує міцність конструкції та загальну масу трьох приводних валів не більш 315 г. Схему керування кроковими двигунами реалізовано на основі трьох драйверів крокових двигунів ULN2003, яка дозволяє працювати з електроживленням моторів від 5 В и 12 В. Драйвер ULN2003 сполучається зі стандартною бібліотекою Arduino Stepper, і має 4 канали для встановлення режимів роботи для моторів. Для синхронізації обертання крокових двигунів 28BYJ-48 застосовується прив'язка одиничного кроку обертання мотора до вбудованого таймера мікропроцесора Arduino Uno Rev3. Технічні параметри цього двигуна відповідають національному електронному стандарту SJ/T10689-95. Кроковий двигун 28BYJ-48 має напругу живлення 5 В, клас енергобезпеки А і рівень шуму більше 40 дБ, що дозволяє використовувати його в енергозберігаючих системах з малим рівнем шуму. Під час розробки програмного забез-

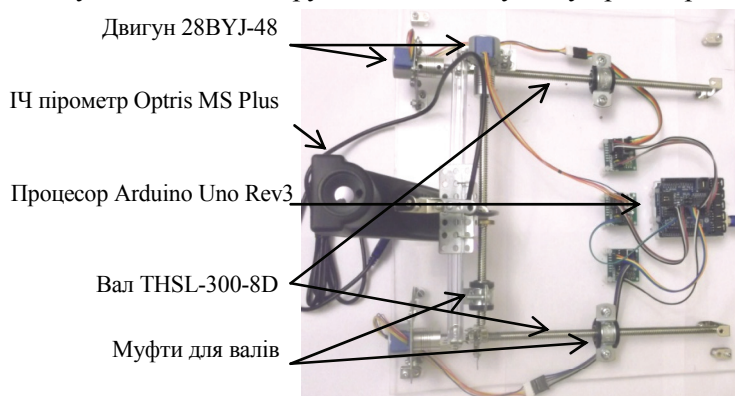


Рис. 3. Система прецизійного позиціонування

печення автоматичне керування кроковими двигунами та системою позиціонування пірометра. Мікропроцесор Arduino Uno Rev3 підключено до драйверів крокових двигунів ULN2003 за стандартною схемою включення у відповідності зі специфікацією і технічним описом [8]. Систему позиціонування реалізовано на основі трьох крокових двигунів 28BYJ-48 і трьох прецизійних приводних валів THSL-300-8D для 3D принтера та має вигляд, показаний на рис. 3.

печення були враховані такі параметри двигуна 28BYJ-48: кількість кроків 64, кількість мікрокроків 4096, кут кожного кроку 5,625 градусів, момент обертання 34,3 Н/м, номінальна тяга 3500 г/см.

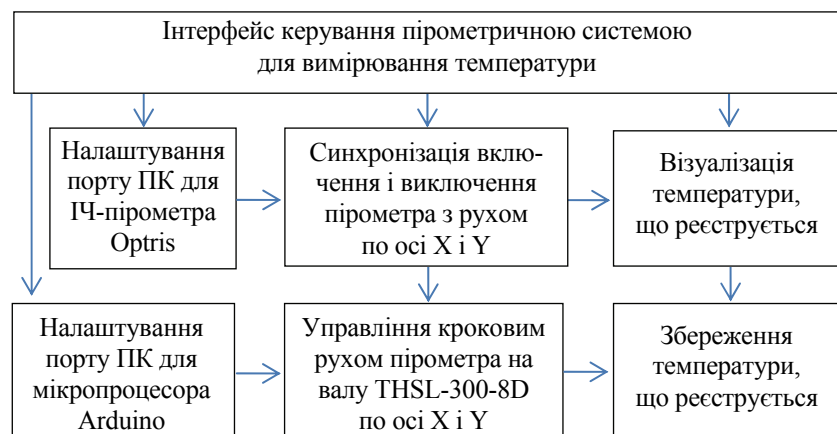


Рис. 4. Система візуального управління пірометричною системою неінвазивного вимірювання температури

Систему візуального керування пірометричною системою для неінвазивного вимірювання температури розроблено у середовищі розробки проектів і обладнання LabView 2010, блок-схему системи показано на рис. 4.

Блок-схема системи візуального керування складається з таких програмних блоків: візуального інтерфейсу керування, модулів настроювання портів персонального комп'ютера (ПК) для підключення інфрачервоного пірометра Optris MS Plus і мікропроцесора Arduino Uno Rev3, модуля синхронізації ввімкнення і вимкнення пірометра, модулів керування рухом пірометра на валу THSL-300-8D, візуальних компонентів LabView 2010 для відображення і збереження температури, що реєструється пірометром.

Фрагмент програмного коду для системи неінвазивного контролю температури в середовищі розробки LabView показано на рис. 5.

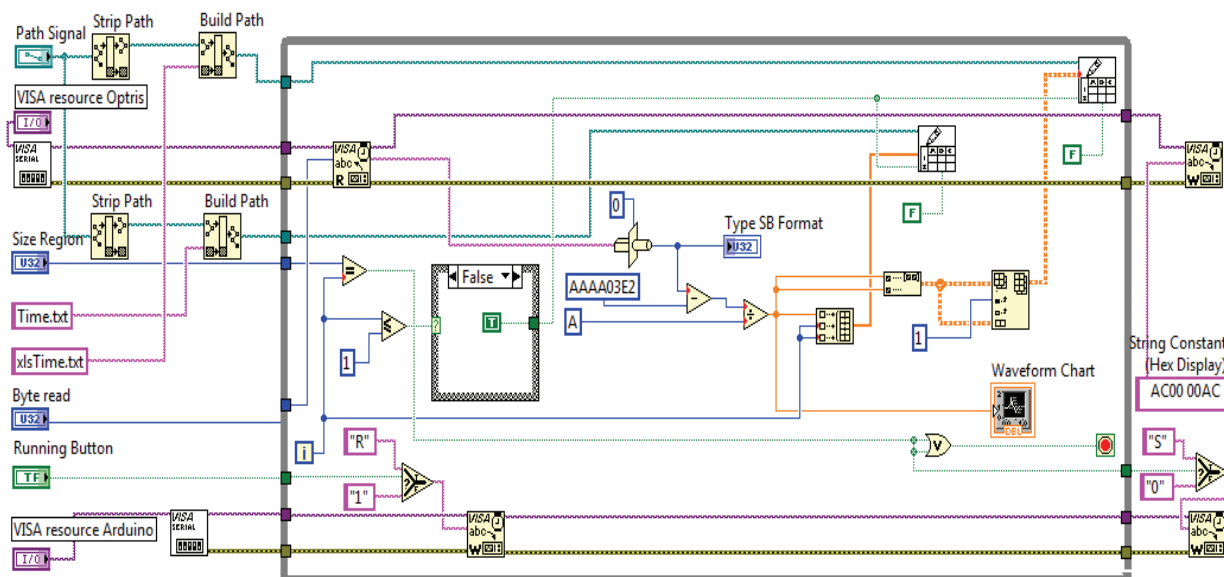


Рис. 5. Фрагмент програмного коду в LabView для системи неінвазивного контролю температури

Програмна реалізація у вигляді віртуального обладнання в середовищі LabView забезпечує виконання таких функцій:

- підключення мікропроцесора Arduino Uno Rev3 і пірометра Optris MS Plus через USB інтерфейс до персонального комп'ютера;
- керування мікропроцесором Arduino Uno Rev3 і читання даних температури в циклі While Loop з пірометра Optris MS Plus за допомогою компонента VISA;
- керування кроковим рухом пірометра на валу THSL-300-8D по осі X (Y) шляхом синхронізації обертання двигунів 28BYJ-48 у моменти часу ввімкнення («R») і вимкнення («S») пірометра Optris MS Plus;
- відображення в компоненті Waveform і збереження температури, що реєструється, в текстовий файл за встановленим шляхом Path Signal.

Інтерфейс керування для системи неінвазивного контролю температури в середовищі розробки LabView показано на рис. 6.

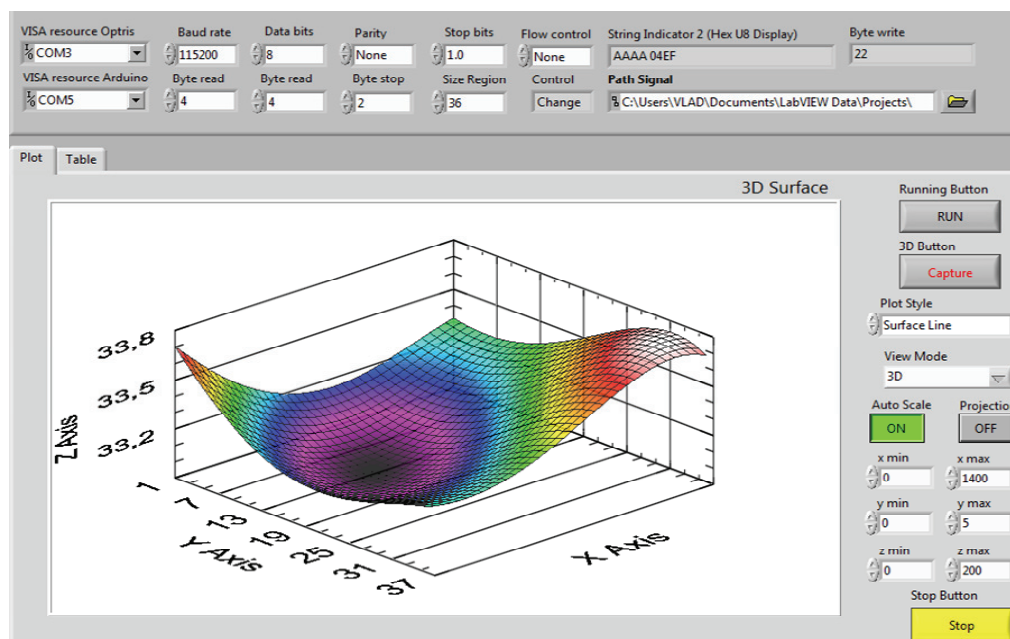


Рис. 6. Інтерфейс керування в LabView для системи неінвазивного контролю температури

Технічні характеристики системи

1	Діапазон вимірювання температури	від -5 до 40 °C
2	Спектральний діапазон	$8 \dots 14$ мкм
3	Погрішність вимірювання температури	$\pm 0,5\%$ або $\pm 0,7$ °C
4	Відстань до об'єкта	не більше 140 мм
5	Коефіцієнт теплового випромінювання	$0,1 \dots 1,1$
6	Оптична роздільна здатність	$20:1$
7	Область сканування	70×70 мм
8	Час відгуку	$0,3$ с
9	Час сканування	36 с
10	Напруга живлення	5 В, від USB
11	Рівень шуму	не більше 40 dB
12	Інтерфейси підключення до ПК	$2 \times$ USB

Таблиця 2 Система неінвазивного контролю температури на основі мікропроцесора Arduino Uno Rev3 і пірометра Optris MS Plus має основні технічні характеристики, наведені у табл. 2.

З аналізу наведених технічних характеристик випливає, що пірометричну систему неінвазивного вимірювання температури можна рекомендувати для вимірювання температур біологічних об'єктів у хірургії, які мають розмір не більше $5 \dots 9$ см на відстанях $1 \dots 15$ см, що забезпечує високу точність вимірювання і візуалізації температурного поля.

Висновки

Розроблена система неінвазивного контролю температури на основі мікропроцесора Arduino Uno Rev3 і пірометра Optris MS Plus дозволяє візуалізувати розподіл температури на поверхні міокарда і визначити області на поверхні міокарда з нерівномірними градієнтами температури. Отриманий за допомогою пірометричної системи розподіл температури в міокарді дає додаткову діагностичну інформацію про наповнення судин серця кров'ю, а також дозволяє оцінити ступінь ішемії судин в умовах штучного кровообігу.

Подальша розробка і практична реалізація системи неінвазивного вимірювання температури серця на основі пірометра є доцільною, оскільки її застосування дозволить значно підвищити точність вимірювання температури, особливо в умовах штучного кровообігу і складних зовнішніх факторах впливу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Фрунзе А. Пірометри спектрального отношения. Преимущества, недостатки, пути их устранения / А. Фрунзе // Фотоника. — 2009. — № 4.
2. Магунов А. Н. Спектральная пирометрия : обзор / А. Н. Магунов // Приборы и техника эксперимента. — 2009. — № 4.
3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Ж. Госсорг. — М. : Мир, 1988. — 416 с.
4. Слезенко А. Пірометри Dwyer: на гребне прогресса [Электронный ресурс] / А. Слезенко ; СВ АЛЬТЕРА, 2017. — Режим доступа : http://www.svaltera.ua/upload/press-center/articles/pirometry_dwyer.pdf.
5. Скрипаль А. В. Тепловизионная биомедицинская диагностика : учеб. пос. для студ. фак. нано- и биомедицинских технологий, обучающихся по спец. «Медицинская физика» и направлению «Биомедицинская инженерия» [Электронный ресурс].

ресурсе] / А. В. Скрипаль, А. А. Сагайдачний, Д. А. Усанов. — Саратов, 2009. — 118 с. — Режим доступа : http://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2014/07/04/teploviz._diagostika_ves_tekst_2009_13.pdf.

6. Optris GmbH. Optris Infrared thermometers. Data Sheet Optris MS LT Series [Electronic resource]. — Access mode: [http://www.optris.ru/ms?file=tl_files/pdf/Downloads/Portable Thermometers/Data Sheet optris MS.pdf](http://www.optris.ru/ms?file=tl_files/pdf/Downloads/Portable%20Thermometers/Data%20Sheet%20optris%20MS.pdf).

7. Шестаков К. М. Лабораторный практикум по курсу «Промышленная электроника»: учеб. пос. для студентов факультета радиопрофики и электроники. — Минск: Белгосуниверситет, 1999. — 60 с.

8. Arduino. Arduino UNO Reference Design. 2017 [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/arduino-uno-schematic.pdf>.

9. LabView 2010 National Instruments [Electronic resource] / LabView Documentation Resources. — Access mode: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371361g.zip>.

Рекомендована кафедрою проектування медико-біологічної апаратури ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.09.2017

Шликів Владислав Валентинович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри біомедичної інженерії, e-mail: v.shlykov@kpi.ua ;

Данилова Валентина Анатоліївна — асистент кафедри біомедичної інженерії, e-mail: valnaa@ukr.net .
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

V. V. Shlykov¹
V. A. Danilova¹

The System of Non-invasive Monitoring of the Temperature of Biological Objects

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

The method for scanning the surface of a biological object using a microprocessor system based on a pyrometer is proposed, which makes it possible to construct the shape of the spectral distribution curve for the power density of the electromagnetic radiation of a biological object in the infrared range and to realize a noninvasive measurement of heart temperature in conditions of cardiopulmonary bypass. The temperature distribution in the myocardium obtained with such a system gives additional diagnostic information on the filling of the blood vessels of the heart with blood, as well as information on the degree of vascular ischemia.

Keywords: heart temperature, pyrometer, microprocessor system, artificial circulation.

Shlykov Vladyslav V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Biomedical Engineering, e-mail: v.shlykov@kpi.ua ;

Danilova Valentyna A. — Assistant of the Chair of Biomedical Engineering, e-mail: valnaa@ukr.net

В. В. Шлыков¹
В. А. Данилова¹

Система неинвазивного контроля температуры биологических объектов

¹Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Предложен способ сканирования поверхности биологического объекта с помощью микропроцессорной системы на основе пирометра, который позволяет построить форму кривой спектрального распределения для плотности мощности электромагнитного излучения биологического объекта в инфракрасном диапазоне, а также реализовать неинвазивное измерение температуры сердца в условиях искусственного кровообращения. Полученное с помощью такой системы распределение температуры в миокарде дает дополнительную диагностическую информацию о наполнении сосудов сердца кровью, а также информацию о степени ишемии сосудов.

Ключевые слова: температура сердца, пирометр, микропроцессорная система, искусственное кровообращение.

Шлыків Владислав Валентинович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри біомедицинської інженерії e-mail: v.shlykov@kpi.ua ;

Данилова Валентина Анатоліївна — асистент кафедри біомедицинської інженерії, e-mail: valnaa@ukr.net