

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-23>

УДК 004.415.3

Осовська Ірина Петрівна, студент

Метелюк Сергій Володимирович, студент

Поліщук Микола Миколайович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-1218-5925>

Конкевич Людмила Миколаївна, асистент

<https://orcid.org/0000-0002-8279-3133>

Луцький національний технічний університет, м Луцьк, Україна

МІКРОКОНРОЛЕРНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ СЕРЦЕВИХ СКОРОЧЕНЬ ЛЮДИНИ

Осовська І. П., Метелюк С.В., Поліщук М.М., Конкевич Л.М. Мікроконтролерна система вимірювання частоти серцевих скорочень людини. У роботі представлено дослідження пристрою для вимірювання функціональних показників частоти серцевих скорочень людини. Основною метою даного дослідження є розробка портативного програмно-апаратного комплексу для моніторингу стану людини, який використовує інтегральний датчик пульсу та мікроконтролер. Результати тестування прототипу системи моніторингу вимірювання частоти серцевих скорочень людини свідчать про подвійне підвищення швидкості вимірювань у порівнянні з економічними готовими пульсоксиметрами. Розроблена система може ефективно використовуватися в повсякденних умовах для моніторингу функціонального стану людини.

Ключові слова: Електрокардіограф (ЕКГ), пульсоксиметр, мікроконтролер, Arduino Nano, частота серцевих скорочень.

Osovska I., Metelyuk S., Polishchuk M, Konkevych L. Microcontroller System for Measuring Human Heart Rate. The paper presents a study of a device for measuring functional indicators of human heart rate. The main goal of this research is to develop a portable hardware and software complex for monitoring the human condition, which utilizes an integrated pulse sensor and a microcontroller. Testing results of the prototype monitoring system for measuring human heart rate indicate a twofold increase in measurement speed compared to economically available pulse oximeters. The developed system can be effectively used in everyday conditions for monitoring the functional state of individuals.

Keywords: Electrocardiogram (ECG), pulse oximeter, microcontroller, Arduino Nano, heart rate.

Постановка наукової проблеми. Статистичні дані свідчать, що захворювання серцево-судинної системи є найпоширенішою причиною смертності у всьому світі. Щорічно в Україні через ці захворювання втрачає життя близько півмільйона осіб, що складає 60% від загальної кількості усіх померлих [1].

Для виявлення захворювань серцево-судинної системи використовують аналіз варіабельності серцевого ритму, що враховує вплив дихальної та нервової систем на роботу серця. Зокрема, вимірювання пульсу широко застосовується в різних діагностичних пристроях як ключовий елемент, визначаючи функціонування серця та організму в цілому. Це зумовлено необхідністю вдосконалення сучасних методів діагностики стану серцево-судинної системи та органів дихання [2].

Електрокардіографія є основним інструментом для діагностики функціонального стану серця, проте останнім часом зростає популярність альтернативних методів, таких як використання фітнес-трекерів, пульсометрів, «розумних» годинників, замість проведення електрокардіограми [3]. Більшість цих пристроїв працюють на основі фотоплетизмографії та вимагають контакту зі шкірою. Однак їх широкому поширенню заважають висока вартість і часті випадки низької якості сигналу для діагностики захворювань. Таким чином, виникає необхідність у пошуках альтернативних джерел самодіагностики.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Моніторинг серцевого ритму став необхідним як для людей, які займаються спортом, так і для тих, хто веде пасивний спосіб життя. Використання пульсометрів дозволяє контролювати роботу серця, встановлювати допустимі навантаження, визначити зони пульсу і виявляти виходи за межі цих зон [4].

При огляді існуючих пристроїв для неінвазійного вимірювання частоти пульсу виявлено суттєвий недолік у системах із вбудованим датчиком вимірювання частоти серцевих скорочень - велика похибка. Ці пристрої чутливі до шумів, точності розташування датчиків відносно артерії, розташування на руці під час моніторингу, а також вимагають прямого контакту датчика з об'єктом [5].

Серед найвідоміших пристроїв для вимірювання частоти серцевих скорочень виокремлюються фітнес-браслети від Xiaomi. Їхня низька ціна та висока якість дозволили компанії увійти в трійку лідерів разом із Apple і Samsung. Перший успішний Mi Band підтвердився, і компанія вирішила не зупинятися на досягнутому, виправивши деякі недоліки. Mi Band 2 від Xiaomi є гідним конкурентом дешевих смарт-годинників [6].

Основна складність у створенні годинників з функцією вимірювання частоти серцевих скорочень полягає в тому, що годинник не може залишатися абсолютно нерухомим на руці протягом усього дня. Рухи руки та ковзання годинника створюють перешкоди, що може впливати на точність вимірювань. Додатково, в годинники, які вимірюють пульс, вбудовують п'єзорезистивні волокна, це робить датчики пристрою більш чутливими до переміщень і дозволяє підвищити точність вимірювань показників. Незважаючи на те, що наручні пульсометри продемонстрували задовільні показники під час проведення тестів, їхня точність залишається низькою [7].

У даній роботі запропоновано покращення існуючих засобів вимірювання показника частоти серцевих скорочень, спрямованих на підвищення точності вимірювань, покращення завадостійкості, компактності та зручності відображення отриманих даних.

Метою дослідження є розробка портативного програмно-апаратного комплексу для моніторингу частоти серцевих скорочень з використанням методу фотометрії, базованого на інтегральному датчику пульсу та мікроконтролері, який дозволить аналізувати властивості пульсової хвилі людини та отримувати дані про її максимальні та мінімальні значення.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Пристрої біомедичної апаратури, такі як електрокардіографи, є медичними електронними пристроями, які вимірюють та реєструють різницю потенціалів між характерними точками на поверхні тіла людини. Основним результатом їх роботи є отримання електрокардіограми (ЕКГ), яка представляє собою графічне відображення різниці потенціалів, які виникають під час роботи серця і реєструються на поверхні тіла. Використання мікроконтролера (МК) у таких приладах спрощує їх структуру, розширює функціональність і підвищує надійність електричної схеми. Це стосується не лише електрокардіографів, але й інших біомедичних пристроїв.

Мікроконтролер може виконувати вимірювання та обробку сигналу ЕКГ, використовуючи вбудовані аналого-цифрові перетворювачі (АЦП). Сигнал ЕКГ зі зондів надходить на вхід АЦП, де він перетворюється з аналогового формату в цифровий. Після цього мікроконтролер зчитує цифрові дані, обробляє їх за допомогою програмного забезпечення і генерує графічне представлення сигналу ЕКГ на дисплеї або записує його на зовнішній носій інформації для подальшого аналізу [8].

Таким чином, використання мікроконтролера в електрокардіографі дозволяє спростити структуру пристрою, збільшити його надійність і забезпечити високу точність вимірювання та обробки даних ЕКГ, що має велике значення для правильної діагностики і лікування пацієнтів.

На рис. 1 представлено узагальнений вигляд розробленого пристрою.

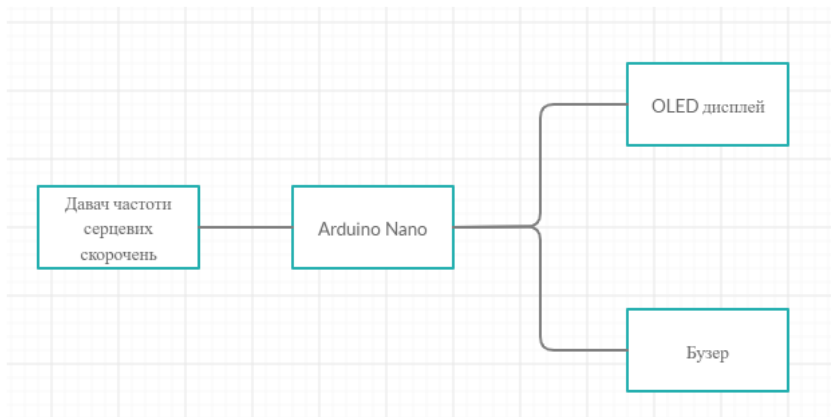


Рис. 1. Загальна структура пристрою

Сам пристрій включає в себе мікроконтролер, який функціонує на платформі Arduino Nano, сенсор пульсу, дисплей для відображення графіків та звуковий сигналізатор [9].

Для взаємодії з датчиком пульсу важливо, щоб мікроконтролер мав аналогово-цифрові входи. У випадку Arduino Nano кількість таких входів становить сім. Діапазон вимірювання знаходиться в межах від 3 до 5 Вольт.

Сенсор пульсу складається з світлодіода та фотодіода, а також необхідної обв'язки для ефективної роботи датчика. Підключення сенсора до Arduino Nano виконано відповідно до схеми, яка зображена на рисунку 2.

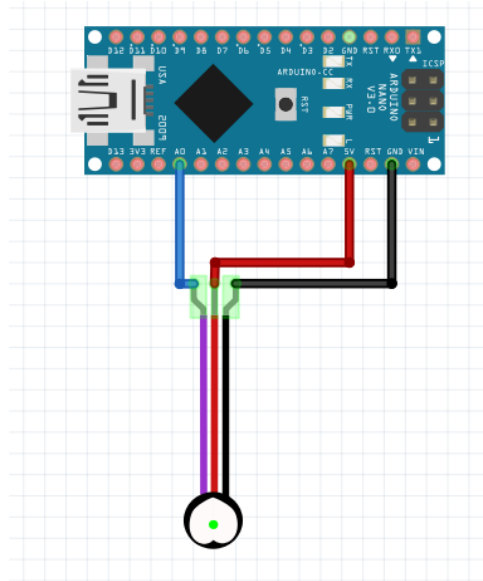


Рис. 2 – Підключення датчика до Arduino Nano

Для відображення графіків та частоти пульсу використовується OLED-дисплей SSD1306 з роздільною здатністю 128x64 пікселі. Цей дисплей працює за протоколом I2C, що робить його сумісним з більшістю мікроконтролерів (рис. 3).

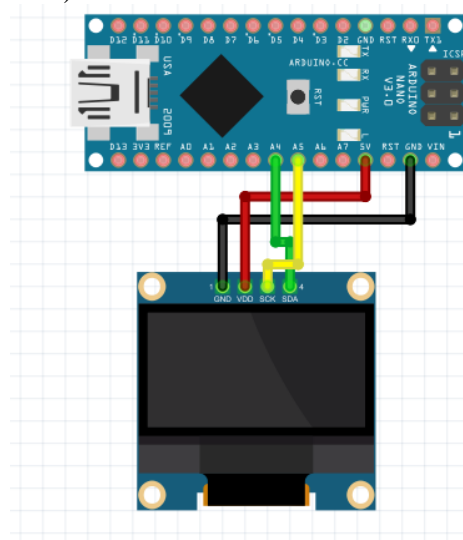


Рис. 3. Підключення дисплея SSD1306 до Arduino Nano.

Середовищем програмування мікроконтролерної системи є Arduino IDE – це інтегроване середовище розробки для програмування мікроконтролерів Arduino та інших сумісних платформ, таких як ESP8266, ESP32, STM32 та інші. Дане середовище є безкоштовним програмним забезпеченням з відкритим кодом, яке дозволяє створювати програми для контролю різних датчиків та виконувати дії з різними пристроями [10].

В програмі Arduino IDE були проведені дослідження частоти серцевих скорочень, результати яких було записано у текстовий файл для подальшого використання в програмі MatLab. Вимірювання проводилися протягом 10 секунд і включали в себе 5 вимірювань, виконаних відповідно до правил для вимірювання пульсу, та наступні 5 вимірювань, під час яких вводилися зовнішні впливи (такі як стрибки та різкі рухи руками), спричиняючи похибку вимірювань.

На основі результатів цих вимірювань був побудований графік, який відображає криві частоти серцевих скорочень в стані спокою (з відповідними правилами вимірювань) і під час руху рук (рис. 4).

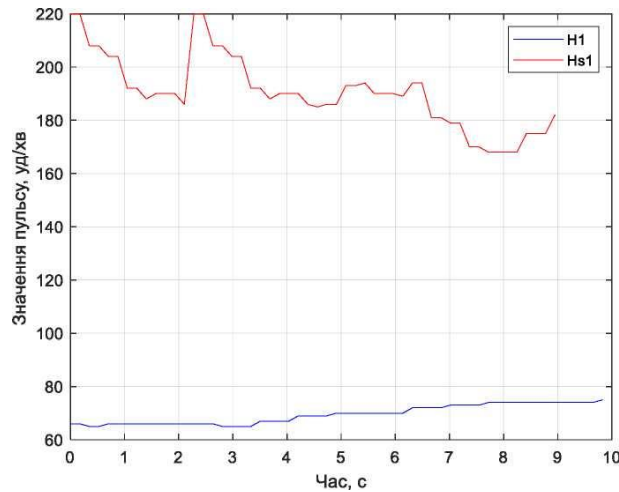


Рис. 4. Графік отриманих сигналів у режимі спокою (H1) та під час руху руки (Hs1)

Додатково, на основі цих даних був проведений спектральний аналіз вимірюваних значень. На рис. 5 наведено спектральні складові сигналів, отриманих у режимі спокою та під час руху руки за допомогою розробленого приладу для вимірювання частоти серцевих скорочень.

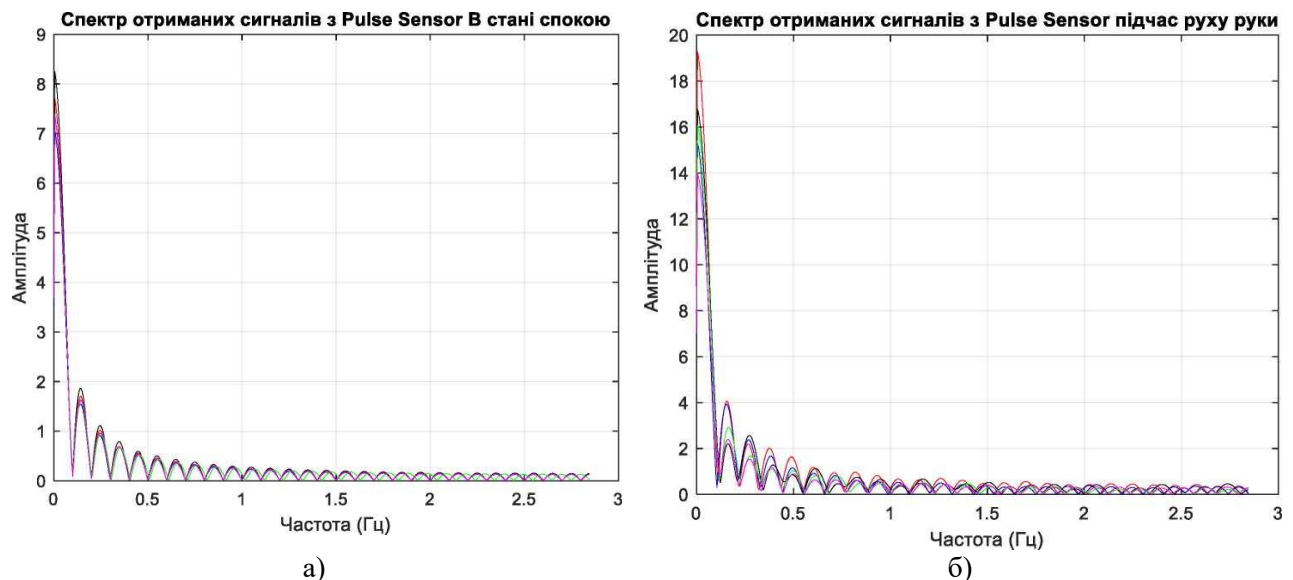


Рис. 5. Спектральні складові сигналів, отриманих у режимі спокою (а) та під час руху руки (б)

Використовуючи спектральний аналіз, було показано взаємозв'язок різних компонентів серцевого ритму, які відображають активність регуляторних механізмів.

Аналізуючи графіки на рисунку 5 – 6, можна зазначити, що спектр сигналів у стані спокою та під час руху рукою відрізняється за амплітудою гармонік, з яких формується сигнал. Застосовуючи статистичні методи, проводиться кількісна оцінка часового ряду сигналів частоти серцевих скорочень. Серед статистичних характеристик часового ряду включають такі параметри:

M – середнє значення інтервалів, які обернено пропорційні частоті серцевих скорочень:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n nn_i,$$

де n кількість елементів, що входять в проміжок часу.

M_x – середньо квадратичне відхилення інтервалів на інтервалі спостереження:

$$M_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (nn_i - M)^2}.$$

D — квадратний корінь із середньої суми квадратів різниці між інтервалами послідовних відліків часового ряду.

$$D = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} (nn_i + nn_n)^2 \right].$$

CV — коефіцієнт варіації, виражений у відсотках.

$$CV = \frac{M_x}{M} \times 100\%.$$

Після отримання вимірювань пульсу за допомогою розробленого пристрою, необхідно переконатися у достовірності отриманих значень. З цією метою проводиться порівняльне вимірювання з використанням двох пристроїв: розробленого і еталонного. У якості еталону обрано пульсоксиметр Fingertip Pulse Oximeter LK-87, оскільки він має схожий принцип дії та кріплення до розробленого пристрою.

Здійснено вимірювання на 10 піддослідних різного віку за допомогою розробленого пристрою та еталонного.

Основні характеристики піддослідних (ПД):

1. ПД 1 – хлопчик, 11 років, відсутність патологій.
2. ПД 2 – дівчинка, 6 років, відсутність патологій.
3. ПД 3 – хлопчик, 13 років, невелика патологія.
4. ПД 4 – хлопець, 35 років, відсутність патологій.
5. ПД 5 – жінка, 35 років, відсутність патологій
6. ПД 6 – чоловік, 38 років, відсутність патологій.
7. ПД 7 – жінка, 57 років, відсутність патологій.
8. ПД 8 – чоловік, 62 роки, невелика патологія.
9. ПД 9 – чоловік, 58 років, невелика патологія.
10. ПД 10 – жінка, 63 роки, наявність аритмії.

Методика вимірювання полягає в спочатку визначенні частоти серцевих скорочень у стані спокою (СС), потім виконанні фізичного навантаження (зазвичай, 20 присідань протягом 30 секунд), вимірюванні цієї величини після навантаження (ПН) і зачікуванні 2–3 хвилини перед повторним вимірюванням у стані відновлення (СВ). Результати вимірювань представлені у табл. 1.

Таблиця 1. Результати вимірювань

Підослідні	Пульсометр Pulse Sensor			Пульсоксиметр		
	СС	ПН	СВ	СС	ПН	СВ
ПД 1	106	152	110	108	152	111
ПД 2	100	160	107	100	160	107
ПД 3	85	120	90	85	121	92
ПД 4	87	132	92	87	132	92
ПД 5	75	129	83	75	129	83
ПД 6	76	115	90	76	115	90
ПД 7	81	142	96	81	141	96
ПД 8	85	135	83	85	136	82
ПД 9	88	134	84	88	134	85
ПД 10	90	113	110	90	113	108

Після фізичних навантажень відбувається збільшення частоти серцевих скорочень (ЧСС), що відображає активність серця. Чим вище значення ЧСС, тим інтенсивніше кров постачається по артеріям. Зазвичай, здорова людина відновлює свій нормальний пульс протягом 5–10 хвилин після завершення фізичного навантаження. Повільне відновлення ЧСС свідчить про можливе надмірне навантаження.

Для аналізу реакції пульсу на фізичне навантаження проводиться порівняння даних про ЧСС у стані спокою (СС) та після навантаження (ПН) з обчисленням відсоткової зміни (табл. 2). Значення ЧСС у стані спокою вважають за 100%, а різниця в частоті до та після навантаження виражається як R.

$$K = (R * 100) / \text{СС}.$$

$$R = \text{ПН} - \text{СС}.$$

Функціональний стан серцево-судинної системи обчислюється за наступною формулою:

$$P = \frac{\text{СС} + \text{СВ}}{2}.$$

Таблиця 2. Аналіз реакції пульсу на фізичне навантаження та результати проби на дозоване навантаження

Підослідні	Розрахунки (К)	Розрахунки (Р)
ПД 1	$\frac{(152 - 106) \times 100}{106} = 43,39\%$	$\frac{106 + 110}{2} = 113$
ПД 2	$\frac{(160 - 100) \times 100}{100} = 60\%$	$\frac{100 + 107}{2} = 103,5$
ПД 3	$\frac{(120 - 85) \times 100}{85} = 41,17\%$	$\frac{85 + 90}{2} = 87,5$
ПД 4	$\frac{(132 - 87) \times 100}{87} = 51,72\%$	$\frac{87 + 92}{2} = 89,5$
ПД 5	$\frac{(129 - 75) \times 100}{75} = 72\%$	$\frac{75 + 83}{2} = 79$
ПД 6	$\frac{(115 - 76) \times 100}{76} = 51,31\%$	$\frac{76 + 90}{2} = 83$
ПД 7	$\frac{(142 - 81) \times 100}{81} = 75,3\%$	$\frac{81 + 96}{2} = 88,5$

ПД 8	$\frac{(135 - 85) \times 100}{85} = 58,82\%$	$\frac{85 + 83}{2} = 84$
ПД 9	$\frac{(134 - 88) \times 100}{88} = 52,27\%$	$\frac{88 + 84}{2} = 86$
ПД 10	$\frac{(113 - 90) \times 100}{90} = 25,25\%$	$\frac{90 + 110}{2} = 100$

Враховуючи інформацію з цієї таблиці, можна зазначити, що більшість піддослідних показали збільшення частоти серцевих скорочень після фізичного навантаження на понад 50%.

Порівнюючи отримані результати з нормами пульсу для різних вікових категорій, можна зазначити, що в 7 піддослідних значення пульсу входить в норму, у 1 піддослідних вони близькі до норми, і у 2 піддослідних значення пульсу перевищують норму. За результатами цих розрахунків можна сказати, що в більшості випадків з віком значення пульсу збільшуються.

На основі результатів експерименту було знайдено значення абсолютної та відносної похибок.

Абсолютна похибка визначається за наступною формулою:

$$\Delta A = A_{\text{вимір}} - A_{\text{дійсне}}$$

де $A_{\text{вимір}}$ – вимірне значення частоти серцевих скорочень за допомогою розробленого пульсометру, $A_{\text{дійсне}}$ – вимірне значення частоти серцевих скорочень за допомогою пульсоксиметру, яке вважається еталонним.

Результати обчислення абсолютної похибки вимірювання експерименту подані у табл. 3.

Таблиця 3. Результати обчислення абсолютної похибки вимірювання експерименту

СС	ПН	СВ
$\Delta A1=108-106=2$	$\Delta A1=152-152=0$	$\Delta A1=111-110=1$
$\Delta A2=100-100=0$	$\Delta A2=160-160=0$	$\Delta A2=107-107=0$
$\Delta A3 = 85 - 85 = 0$	$\Delta A3=121-120=1$	$\Delta A3=92-90=2$
$\Delta A4 = 87 - 87 = 0$	$\Delta A4 = 132 - 132 = 0$	$\Delta A4 = 92 - 92 = 0$
$\Delta A5 = 75 - 75 = 0$	$\Delta A5 = 129 - 129 = 0$	$\Delta A5 = 83 - 83 = 0$
$\Delta A6 = 76 - 76 = 0$	$\Delta A6=115-115=0$	$\Delta A6=90-90=0$
$\Delta A7 = 81 - 81 = 0$	$\Delta A6=141-142=-2$	$\Delta A7=96-96=0$
$\Delta A8 = 85 - 85 = 0$	$\Delta A7=136-135=1$	$\Delta A8=82-83=-1$
$\Delta A9 = 88 - 88 = 0$	$\Delta A8=134-134=0$	$\Delta A9 = 85 - 84 = 1$
$\Delta A10=90-90=0$	$\Delta A9=113-113=0$	$\Delta A10=108-110=-2$

Після аналізу обчислених значень абсолютної похибки було зроблено висновок, що відхилення результатів, а саме абсолютна похибка вимірювання, створеного пристроєм для визначення частоти серцевих скорочень від показників пульсоксиметру, не перевищує 2%, що відповідає припустимому стандарту.

Висновки. Було спроектовано та розроблено мікроконтролерну систему для моніторингу частоти серцевих скорочень на основі сучасного мікроконтролера Arduino Nano. Використання портативного пульсометра дозволяє здійснювати моніторинг пульсу людини, уникаючи використання багатьох

технічних засобів, клем, або великої кількості дротів для з'єднання. Розроблена мікроконтролерна система відрізняється високою енергоефективністю, точністю вимірювань та доступною вартістю. Крім того, діагностичні дані можна записувати на зйомний носій інформації та у подальшому досліджувати, використовуючи спеціалізоване програмне забезпечення, розроблене в середовищі MatLAB на персональному комп'ютері.

Список бібліографічного опису

1. Кількість померлих за окремими причинами смерті. Державна служба статистики України. URL: https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/ds/krops/arh_krops2021_u.html.
2. Крючко І., Петросян Л., Стенцель Й. Дослідження функціонального стану серцево-судинної системи організму людини. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2016. С. 97–102.
3. Ramasamy S., Balan A. Wearable sensors for ECG measurement: A review. *Sens. Rev.* 2018 doi: 10.1108/SR-06-2017-0110.
4. Rákay, R. ., & Galajdová, A. . (2021). КОНЦЕПЦІЯ МОНИТОРИНГУ ФІЗІОЛОГІЧНИХ ФУНКЦІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ НОСИМИХ СЕНСОРІВ. *Технічні науки та технології*, (4(22)), 190–197. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-190-197](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-190-197).
5. Шарпан О.Б. Аналіз характеру залежності між пульсовим тиском в артерії та амплітудою неінвазивно зареєстрованого пульсового сигналу / О.Б. Шарпан, О.П. Мітров // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2006. – № 33. – с. 136-141.
6. Годинники з функцією вимірювання артеріального тиску. URL: <https://www.a-betka.in.ua/2017/04/godynyky-dljayumiryuvannya-arterialnogo-tysku.html>.
7. Guzik P., Malik M. ECG by mobile technologies. *J. Electrocardiol.* 2016; 49:894–901. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2016.07.030.
8. Ibrahim D., Buruncuk K. Heart rate measurement from the finger using a low cost microcontroller. URL: https://www.emo.org.tr/ekler/a568a2aa8c19a31_ek.pdf.
9. Півень В.В. Первинні перетворювачі вимірювання серцебиття на базі платформи Arduino. Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих науковців 19 лютого 2019 р., м. Миколаїв: тези доп. Комп'ютерна інженерія. Чорном. Нац. Ун-т ім. Петра Могили. – Миколаїв: Видво ЧНУ ім. Петра Могили, 2019. С. 49–51.
10. Кривонос О.М. Огляд платформи Arduino Nano 3.0 та перспективи використання під час навчального процесу / О. М. Кривонос, Є. В. Кузьменко, С. В. Кузьменко // Інформаційні технології і засоби навчання. Том 56, № 6. - Київ, 2016. – С.79-80.

References

1. Number of dead by individual causes of death. State Statistics Service of Ukraine. URL: https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/ds/krops/arh_krops2021_u.html.
2. Kriuchko I., Petrosyan L., Stentzel Y. Investigation of the functional state of the cardiovascular system of the human body. *Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University.* 2016. P. 97–102.
3. Ramasamy S., Balan A. Wearable sensors for ECG measurement: A review. *Sens. Rev.* 2018 doi: 10.1108/SR-06-2017-0110.
4. Rákay, R. ., & Galajdová, A. . (2021). Concept For Physiological Function Monitoring With Wearable Sensors. *Technical Sciences And Technologies*, (4(22)), 190–197. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4\(22\)-190-197](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-4(22)-190-197).
5. Sharpan O.B. Analysis of the relationship between pulse pressure in the artery and the amplitude of the noninvasively recorded pulse signal / O.B. Sharpan, O.P. Mitrov // *Bulletin of NTUU "KPI". Radio Engineering and Radio Apparatus Construction Series.* 2006. No. 33. P. 136-141.
6. Watches with the function of measuring arterial pressure. URL: <https://www.a-betka.in.ua/2017/04/godynyky-dljayumiryuvannya-arterialnogo-tysku.html>
7. Guzik P., Malik M. ECG by mobile technologies. *J. Electrocardiol.* 2016; 49:894–901. doi: 10.1016/j.jelectrocard.2016.07.030.
8. Ibrahim D., Buruncuk K. Heart rate measurement from the finger using a low cost microcontroller. URL: https://www.emo.org.tr/ekler/a568a2aa8c19a31_ek.pdf
9. Piven V.V. Primary converters for heart rate measurement based on the Arduino platform. All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, February 19, 2019, Mykolaiv: Theses of Reports. Computer Engineering. ChNU named after Petro Mohyla. – Mykolaiv: Publishing House of ChNU named after Petro Mohyla, 2019. P. 49–51.
10. Krivonos O.M. Overview of the Arduino Nano 3.0 platform and prospects for use in the educational process / O. M. Krivonos, Ye. V. Kuzmenko, S. V. Kuzmenko // *Information Technologies and Learning Tools.* Vol. 56, No. 6. - Kyiv, 2016. – P.79-80