

ДУМИН ІГОР

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0003-2708-0429>e-mail: ihor.r.dumyn@lpnu.ua

НАКОНЕЧНИЙ АНДРІЙ

Національний університет "Львівська політехніка"

<https://orcid.org/0000-0002-1873-6337>e-mail: admakon@gmail.com

РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ АНАЛІЗУ І ОБРОБКИ ЕКГ СИГНАЛІВ

В роботі наведено підходи та основні виклики в обробці сигналів ЕКГ та наведено результати аналізу публікацій на тему методів та засобів дослідження ЕКГ у вейвлет області.

Ключові слова: цифрова обробка сигналів, Вейвлет перетворення, ЕКГ, QRS.

DUMYN IHOR

Lviv Polytechnic National University

NAKONECHNYI ADRIAN

Lviv Polytechnic National University

EXPANDING THE POSSIBILITIES OF ELECTROCARDIOGRAM SIGNALS PROCESSING AND ANALYSIS

Modern functional diagnostics of cardiovascular diseases have a large number of different instrumental research methods at their disposal, but one of the most common is electrocardiography (ECG). Since its discovery, this method of studying the bioelectrical activity of the heart has been a leading method in the diagnosis of rhythm and conduction disorders, coronary heart disease, and other diseases of the cardiovascular system [2]. For traditional methods of ECG analysis, such as visual inspection, the doctor identifies characteristic visible features on the ECG. An unusually long PR interval, for example, indicates a conduction defect in the atria, or a prolonged QT interval can lead to an abnormal heart rhythm. Unfortunately, for many medical problems, such significant signs cannot be identified so easily. In addition, standard characteristics such as PR interval, QRS width, or ST level are ambiguous in many cases. As a result, sophisticated feature extraction methods are used. Such methods try to find new features that allow the diagnosis of CVD based on the ECG. These features can be obtained from the ECG in the time domain, ECG in the time-frequency domain, or ECG in the frequency domain. These features can then be processed using various approaches such as visual inspection or machine learning algorithms [3].

With the growth of computing performance and the development of digital signal processing, it is important to solve the problems of classification/clustering of ECG signals, as well as forecasting problems using this approach. Achieving high results in solving these problems is impossible without providing an in-depth analysis of such signals, which can be achieved by using wavelet processing with the subsequent use of neural networks. Unlike the Fourier transform, the wavelet transform provides a two-dimensional representation of the signal, with the scale and time offset considered independently, making it possible to analyze signals in two independent spaces simultaneously - scale and time. The results of ECG wavelet analysis contain not only information about the distribution of cardiac signal energy by frequency components but also information about the time coordinates at which certain frequency components are detected or at which rapid changes in the frequency components of the cardiac signal occur.

This paper reviews existing studies using the wavelet transform (WT) to detect electrocardiogram (ECG) complexes, analyze ECG signals to identify features of the studied signal complexes and analyze decomposed signals to obtain in-depth diagnostic data. The reviewed studies show the high efficiency of using this method for signal analysis and open the way for further research in the direction of identifying additional information from the ECG signal, which would serve as the basis for early diagnosis of CVD.

Keywords: digital signal processing, Wavelet transform, ECG, QRS.

Постановка проблеми

Серцево-судинні захворювання (ССЗ) це перша причина смерті у світі: щорічно більше людей помирає від ССЗ, ніж від будь-яких інших хвороб. За оцінками ВООЗ 17,9 мільйона людей померли від ССЗ у 2019 році, що становить 32 % від усіх смертей у світі. З них 85 % смертей — через серцевий напад та інсульт [1]. Для запобігання цій сумній статистиці необхідно проводити розробку нових методів аналізу таких захворювань з метою раннього їх діагностування та можливого прогнозування виникнення.

Аналіз останніх джерел

Відомо, що електрокардіографія (ЕКГ) відіграє вирішальну роль у діагностиці серцевих захворювань. Такий процес передбачає захоплення та запис біоелектричних сигналів, що надсилаються серцем, та їх інтерпретацію для визначення стану здоров'я серця. Однак такі сигнали часто переповнені шумом та іншими завадами. В такому випадку на допомогу оцінки таких сигналів приходять подання їх у часо-частотній, вейвлет області.

Вейвлет-перетворення - математичний апарат, який дозволяє проводити аналіз отриманих функціональних залежностей одночасно в часовий та частотній областях [8]. Саме тому вейвлет-перетворення відіграє важливу роль в обробці сигналів ЕКГ з багатьох причин:

Виділення ознак: вейвлет-перетворення є корисним для вилучення критичних ознак з сигналів ЕКГ, таких як комплекси QRS або виявлення зубців Р і Т, що допомагає краще діагностувати різні аномалії серця [4].

Виявлення аномалій: за допомогою вейвлет-перетворення можна виявити і діагностувати відхилення в сигналах ЕКГ, що включає виявлення аритмій, підйом сегмента ST і прогнозування навіть раптової серцевої

смерті. Оскільки вейвлет-перетворення чудово фіксує інформацію, як про частоту, так і про часове місцезнаходження, воно допомагає лікарям точно визначити, де саме лежать відхилення [6].

Покращення візуалізації: вейвлет-перетворення покращує видимість дрібних важливих деталей в ЕКГ-сигналі, що може сприяти кращому графічному зображенню і кращій діагностиці [5].

Крім того, вейвлет-перетворення є важливим інструментом в обробці ЕКГ-сигналів. Воно є ключовим для мінімізації шуму, покращення виявлення нерівностей, покращення візуалізації та виділення особливостей в ЕКГ-сигналах. Його застосування продовжує зростати із зростанням прогресу в галузі обробки сигналів.

Таким чином, метою даної роботи є: аналіз праць пов'язаних з обробкою ЕКГ сигналів з використанням апарату вейвлет перетворення та вибір напрямків майбутніх досліджень.

Виклад основного матеріалу

Підходи до обробки сигналу ЕКГ

Основні методи перетворення та обробки ЕКГ-сигналів включають низку кроків, спрямованих на підвищення якості ЕКГ-сигналів та отримання з відповідних інформативних складових. Дані кроки зазвичай передбачають:

- попередню обробку; передбачає видалення шуму, артефактів і дрейф базової лінії із сигналу ЕКГ;
- виділення комплексів; передбачення ідентифікації ключових характеристик сигналу ЕКГ, таких як комплекс QRS, зубець Р і зубець Т та вимірювання їх характеристик, таких як амплітуда, тривалість і морфологія;
- класифікацію; включає класифікацію ЕКГ-сигналу на основі ідентифікованих ознак і характеристик; методи класифікації можуть включати розпізнавання образів, машинне навчання та алгоритми прийняття рішень.
- інтерпретацію; передбачається аналіз результатів класифікації та виявлення будь-яких аномалій або ознак захворювання; методи інтерпретації можуть включати системи, засновані на знаннях, клінічних рекомендацій та медичних експертиз.

Складнощі та виклики в процесі обробки сигналів ЕКГ

Обробка сигналів ЕКГ є ключовим етапом, який передує діагностиці та прийняттю рішень у тактиці лікування захворювань серця. Однак під час обробки сигналів виникає ряд труднощів, які впливають на точність і надійність результатів дослідження. До поширених складнощів обробки сигналів ЕКГ можна віднести:

- сигнали ЕКГ переважно поступають з шумом від різних джерел, таких як рух м'язів, електричні перешкоди та дрейф базової лінії, що може ускладнювати ідентифікацію та виділення відповідних характеристик сигналів, наприклад комплексу QRS.
- наявність артефактів – аномальні сигнали, які можуть виникати під час отримання або обробки сигналів ЕКГ; вони можуть включати рух електродів, дрейф базової лінії та проблеми з контактами електродів, саме артефакти можуть спотворювати сигнали і ускладнювати їх інтерпретацію.
- сигнали ЕКГ можуть суттєво відрізнитися між людьми та навіть в межах однієї особи в часі, що може ускладнювати встановленню нормальних діапазонів та діагностуванню аномалій.
- наявність неоднозначності; отримані сигнали ЕКГ можуть бути неоднозначними, тобто різні аномалії, можуть спричинити подібні характеристики або еквівалентні характеристики сигналу, що може ускладнити розрізнення станів і точну діагностику основної проблеми.
- обчислювальна складність; обробка ЕКГ-сигналу часто вимагає використання складних алгоритмів і обчислювальних затрат, що є складним і високоартістичним в обчислювальному плані та трудомістким і може обмежити реалізацію обробки сигналу ЕКГ у реальних клінічних умовах.

Використання вейвлет перетворення для обробки ЕКГ сигналу

Виділення комплексів ЕКГ

В даному дослідженні для виділення компонентів ЕКГ-сигналу з використанням неперервного вейвлет-перетворення [8] пропонується використання вейвлет функції «*bio1.5*» з масштабом 15 для виявлення QRS-комплексу та 41 для виявлення Р і Т зубців. Як показують результати експерименту масштаби 15 і 41 забезпечують найбільшу точність при виявленні даних комплексів досліджуваного сигналу.

У даному підході для виявлення точок комплексів пропонується використовувати граничне значення, що дорівнює половині глобального максимуму (мінімуму): $t1=0,5\max(\{C(i)\})$ або $t2=0,5\min(\{C(i)\})$, де $C(i)$ - вейвлет-коефіцієнти, а $i=1..N$. Беручи до уваги велику амплітудну різницю між QRS-комплексом і Р, Т зубцями, для точного виявлення Р і Т зубців, після виявлення QRS-комплексів, необхідно «видалити» їх (QRS-комплекси), апроксимуючи лінійно кожен таку ділянку сигналу. Таким чином, пропонується наступний алгоритм виявлення:

1. Виділення QRS-комплексів:

- застосування вейвлет перетворення («*bio1.5*») з масштабним коефіцієнтом $a = 15$;
- обчислення порогових значень $t1=0,5\max(\{C(i)\})$ та $t2=0,5\min(\{C(i)\})$;
- знаходження пари коефіцієнтів, які перетинають нульовий рівень;
- вибір двох послідовних пар так, щоб між кожною з них знаходився вейвлет-коефіцієнт, що перевищує по модулю значення порогу $t1$ і $t2$. Перший вейвлет-коефіцієнт є початком QRS-комплексу, другий - піком, а третій - його закінченням.

2. Видалення QRS-комплексів з виконанням лінійної апроксимації ділянок сигналу між точками, позначеними як початок і закінчення QRS-комплексів.

3. Виділення Р і Т зубців:

- використання вейвлет-перетворення з масштабним коефіцієнтом $a = 41$;
- обчислення порогових значень $t1=0,5\max(\{C(i)\})$ та $t2=0,5\min(\{C(i)\})$;
- знаходження пари вейвлет-коефіцієнтів, які лежать по обидві сторони від нульового рівня;
- вибір двох послідовних пар вейвлет-коефіцієнтів так, щоб між кожною з них знаходився вейвлет-коефіцієнт, що перевищує по модулю значення порога $t1$ і $t2$. Перший вейвлет-коефіцієнт є початком Р-зубця, другий - піком зубця, а третій - його зміщенням;
- вибір наступних двох послідовних пар вейвлет-коефіцієнтів аналогічним чином, як і дві попередні. Перший вейвлет-коефіцієнт буде початком Т-зубця, другий - піком зубця, а третій - його зміщенням.
- результати виділення комплексів представлені на Рис. 1-5.

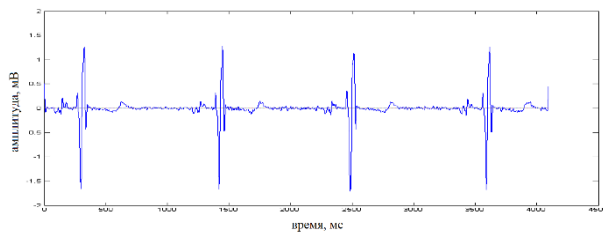


Рис. 1 Застосування ВП з масштабним коефіцієнтом $a=15$ до ЕКГ-сигналу

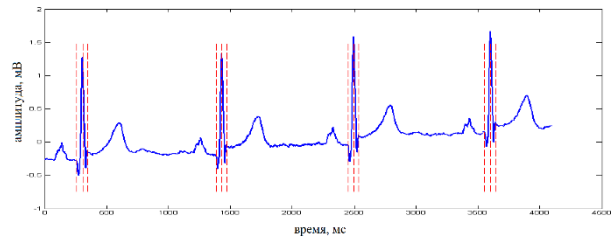


Рис. 2 Виділені QRS-комплекси ЕКГ-сигналу

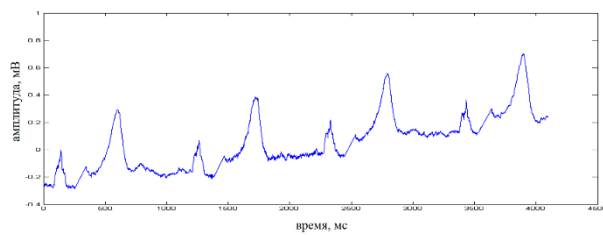


Рис. 3 «Видалення» QRS-комплексів з ЕКГ-сигналу

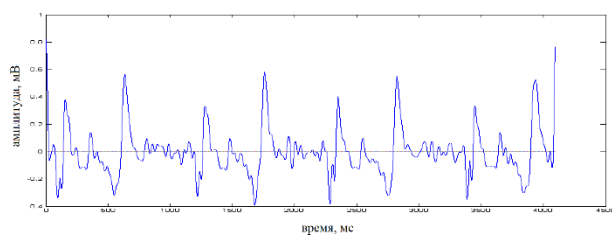


Рис. 4 Застосування ВП з масштабним коефіцієнтом $a=41$

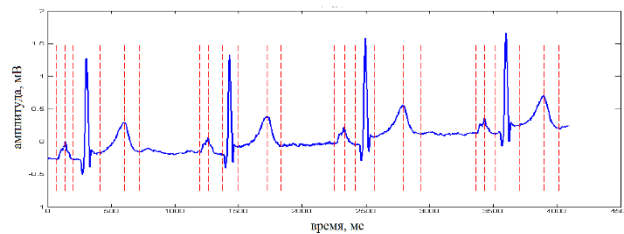


Рис. 5 Виділені Р і Т зубці ЕКГ-сигналу

В результаті проведеного дослідження на вибірці з ЕКГ Phisionet, використовуючи сигнали з різними патологіями, Р-QRS-Т комплекси було виявлено з точністю, що варіювалась в діапазоні 0,5-1% [4].

Виділення особливостей у комплексах ЕКГ

Особливо потрібною з точки зору діагностування серцево-судинних захворювань є додаткова інформація, яка міститься у комплексах ЕКГ сигналу, яку в рамках перетворення і оброблення потрібно обов'язково враховувати. При цьому пропонується виконувати синтез спеціалізованих вейвлет функцій для вирішення задач виділення пізніх потенціалів передсердь (ППП). Необхідно враховувати неінвазивні електрокардіографічні критерії наявності високої аритмічної готовності та ризику появи небезпечних для життя аритмій при аналізі Р-зубця електрокардіосигналу за допомогою неперервного вейвлет перетворення.

В частотному поданні сигнал ЕКГ має різні складові: низькочастотні та низькоамплітудні Р і Т зубці, більш високочастотний і найбільший за амплітудою QRS комплекс і пізні потенціали, що характеризуються найменшою амплітудою і високою частотою. Найбільш за все ускладнюють виявлення пізніх потенціалів шумові компоненти ЕКГ сигналу (Рис. 6).

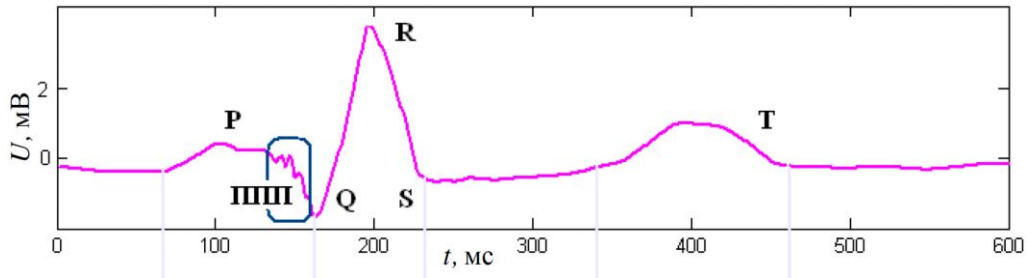


Рис.6 Сигнал ЕКЗ з ППП

В даному випадку розглянуто необхідність створення нової вейвлет-функції на основі моделі ППП, яку пропонується формувати шляхом наближення за методом найменших квадратів до моделі мікросплесків із задоволенням вимог, що висуваються до вейвлет-функцій [5,7]. Дана функція дозволяє проводити виділення ППП при її використанні у неперервному вейвлет перетворенні (НВП) для Р зубця (Рис. 7).

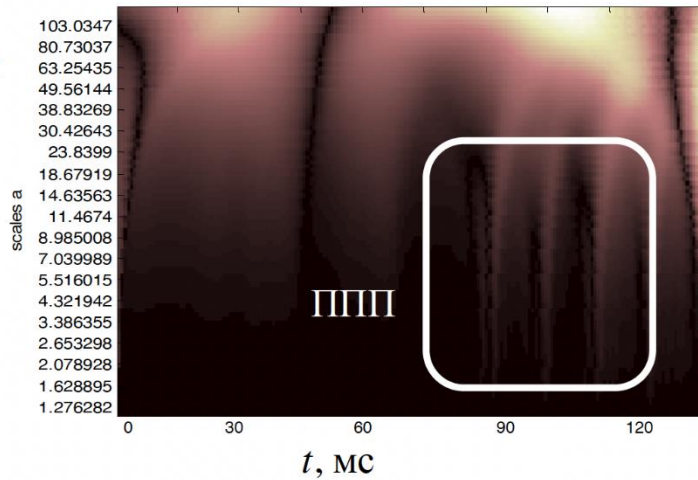


Рис. 7 Зубець Р з використанням синтезованої вейвлет-функції (присутні 4 ППП)

Для порівняння ефективності виявлення ППП за допомогою вейвлет-функцій, адаптованих до форми ППП, і стандартних вейвлетів були обчислені статистичні характеристики. З метою отримання числових характеристик при аналізі Р зубця з наявністю ППП розраховується усереднена крива значень вейвлет-коефіцієнтів для всіх масштабів обраного діапазону:

$$W(t) = \frac{1}{M_{ППП}} \sum_{k=1}^{ППП} W_k(t),$$

де $W_k(t)$ - вектор значень вейвлет-коефіцієнтів для кожного з масштабів на зазначеному проміжку, $M_{ППП}$ є довжиною вектора масштабів.

Серед стандартних вейвлет-функцій для порівняння були обрані вейвлет-функції Добеші 4-го порядку, “койфлет” 4-го порядку, “симлет” 4-го порядку, Мейера (db4, coif4, sym4, meyr) як вейвлети, що дозволяють отримати більш наочні скейлограми кардіоциклів з ППП, у порівнянні з іншими стандартними вейвлетами.

У табл. 1 наведено нормовані значення середнього квадратичного відхилення σ/σ_{max} для усередненої кривої значень вейвлет-коефіцієнтів і нормовані значення площі під усередненою кривою абсолютних значень вейвлет-коефіцієнтів S/S_{max} для різних вейвлет-функцій, де σ та S — значення середнього квадратичного відхилення і площі під кривою для даного вейвлета, σ_{max} та S_{max} — максимальні значення даних параметрів серед усіх вейвлетів, які досліджувалися.

Таблиця 1

Параметри σ/σ_{max} та S/S_{max} , отримані при використанні різних вейвлет-функцій

	Синтезований вейвлет	db4	sym4	coif4	meyr
σ/σ_{max}	1	0,8	0,91	0,9	0,71
S/S_{max}	1	0,55	0,62	0,65	0,48

З отриманих результатів наведених у табл. 1 можна стверджувати, що при застосуванні адаптованої вейвлет-функції для виявлення ППП площа під усередненою кривою абсолютних значень вейвлет-коефіцієнтів значно перевищує даний параметр, отриманий при НВП з використанням стандартних вейвлет-

функцій. В свою чергу це підтверджує високу ефективність даного методу для виявлення особливостей у комплексах ЕКГ сигналів.

Аналіз сигналів оброблених з використанням вейвлет перетворення

В рамках даного дослідження було використано вейвлет перетворення для діагностування інфаркту міокарда. Для розрізнення сигналів від здорового пацієнта і пацієнта з патологією, було застосовано перехресне взаємне вейвлет перетворення, що ґрунтується на неперервному вейвлет перетворенні з використанням вейвлету Морле, як материнської функції [6].

$$WBCAF(s, \tau) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{da}{a_2} \int_{-\infty}^{\infty} [W_g \tau_1(a, b)] [W_g^* \tau_2(sa, sb - \tau)] db,$$

де $W_g \tau_1(a, b)$ - вейвлет перетворення сигналу здорового пацієнта; відносно базової функції g ,
 $W_g^* \tau_2(sa, sb - \tau)$ - вейвлет перетворення сигналу пацієнта з патологією; відносно базової функції g ,
 a, b - часовий масштаб і зміщення відповідно.

З використанням даного підходу виділено QT зону, яка містить в собі основні ознаки наявності інфаркту міокарда, і відмінності між областями досліджуваного та стандартного сигналів. Для пошуку подібностей у хвилювих формах сигналу, було виділено такти биття серця, основним елементом якого є R-пік. Для виявлення та визначення піку на ЕКГ, використано дискретне вейвлет-перетворення сигналу з подальшим відновленням сигналу за коефіцієнтами 4 та 5 рівнів. Коефіцієнти 4 і 5 рівнів містять ту частотну інформацію, яка відповідає R-пікам ЕКГ сигналу, що потрібна для виділення серцевих тактів.

В результаті проведеного взаємного вейвлет перетворення виявлено, що область QT-зони знаходиться в інтервалі відліків від 350 до 750 - зліва від піку R і на деякій відстані від нього ж справа. Для подальшого дослідження розглядався і аналізувався саме цей часовий проміжок. При цьому проводилось сумування значення спектра або кореляції в інтервалі від 350 до 750 за часом та за всіма значеннями масштабів, згідно наступного виразу:

$$WCS(s) = \sum_{t=350}^{750} WCS(s, t)$$

В подальшому проводилось визначення значущого для виявлення інфаркту міокарда інтервалу масштабів, який дозволяє розрізнити з більшою ефективністю здоровий та патологічний сигнали. З наведеного Рис. 8 видно, що значимий для виявлення інфаркту міокарда інтервал масштабів знаходиться між 75 та 325 масштабами.

На основі отриманих інтервалів за часом та масштабами сумарних значень спектра та кореляції отриманий точковий графік залежності вейвлет-спектра від вейвлет-кореляції (Рис.9), який дозволяє діагностувати ознаки початкових захворювань серцево-судинної системи.

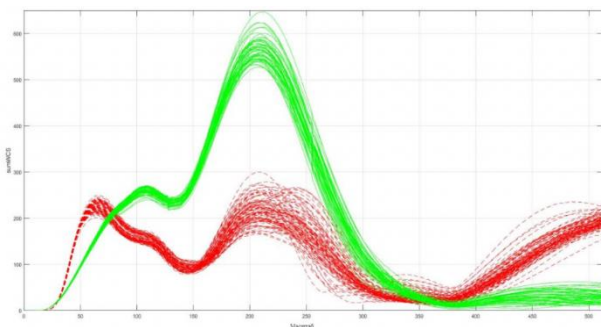


Рис. 8 Просумований спектр здорового і патологічного сигналів

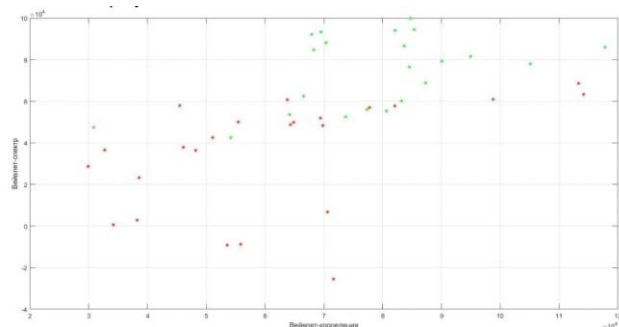


Рис. 9 Розміщення виділених ознак в просторі

Висновки

З наведеного дослідження можна стверджувати, що вейвлет перетворення можна широко використовувати в медицині для проведення комплексного аналізу нестационарних сигналів, зокрема ЕКГ як одного з представників цієї множини. Вейвлет перетворення дає можливість суттєво зменшувати шуми і артефакти сигналів, дозволяє проводити виділення комплексів ЕКГ сигналів з подальшою їх класифікацією та вимірюванням їхніх характеристик.

Розглянуті дослідження показують можливість отримання додаткової діагностичної інформації в ЕКГ комплексах, а також дають можливість індивідуального підходу до аналізу отриманих результатів до кожного з комплексів ЕКГ сигналу. Дані твердження дозволяють розглядати та аналізувати нові алгоритми обробки ЕКГ сигналів, що відкривають можливості для майбутніх досліджень, метою яких є отримання

додаткової діагностичної інформації для лікування чи прогнозування серцево-судинних захворювань.

Література

1. Cardiovascular diseases (CVDs). World Health Organization (WHO). URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-cvds>
2. В. А. Візір, О. В. Деміденко, І. Б. Приходько [та ін.]. - Електрокардіографія. Функціональні ЕКГ тести. Амбулаторне моніторування ЕКГ (за Холтером) та артеріального тиску: навч.-метод. посіб. до практичних занять з функціональної діагностики для студентів 5 курсу медичних факультетів. У 3-х ч. Ч. 1, - . - Запоріжжя, ЗДМУ, 2019. – 103 с.
3. Böck C. ECG Signal Analysis based on the Wavelet Transform : MASTER'S THESIS. Graz, 2015. 101 p.
4. Твердохліб Ю. В. Методи та інформаційна технологія комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06. Запоріжжя, 2018. 178 с.
5. Цифрова обробка низькоамплітудних компонент електрокардіосигналів: Навч. посіб./ Н.Г. Іванушкіна, К.О. Іванько. — К.: НТУУ “КПІ”, 2014. — 182 с.
6. Обнаружение инфаркта миокарда с использованием вейвлет анализа ЭКГ сигнала, Н.С. Давыдов, А.Г. Храмов, Науки о данных с.2143-2148
7. Lagun I., Nakonechnyy A., Samoty V. "Using fuzzy logic to optimise the selection of mother wavelets" Krasow University of Technology, Technical Transactions, Issue 3, Volume 2018 ((115), 107 – 114pp.
8. Наконечний А.Й., Лагун І.І., Верес З.С., Наконечний Р.А., Федак В.І. «Теорія і практика оброблення сигналів у малошхвильовій (wavelet) області» / Монографія. – Львів: Растр – 7, 2020 – 470с.
9. Лагун І.І. Багатокритеріальна оптимізація вибору базових функцій в процесі малошхвильового перетворення сигналів / Лагун І.І., Наконечний А.Й. // Науковий збірник Української академії друкарства “Комп’ютерні технології друкарства” –Львів. 2017. № 37- С.63 – 67
10. Surda, Jozef & Lovas, Stanislav & Pucik, Jozef & Jus, Milan. (2007). Spectral Properties of ECG Signal. 2007 17th International Conference Radioelektronika. 1-5. 10.1109/RADIOELEK.2007.371653.
11. Banerjee, Swati & Mitra, Madhuchhanda. (2014). Application of Cross Wavelet Transform for ECG Pattern Analysis and Classification. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on. 63. 326-333. 10.1109/TIM.2013.2279001.
12. Haque, A.K.M Fazlul & Ali, Hanif & Kiber, Md & Hasan, Md. Tanvir. (2009). Detection of small variations of ECG features using wavelet. Journal of Engineering and Applied Sciences. 4.
13. Хома Ю.В. Класифікація віброартрографічних сигналів з використанням хвильового перетворення і технологій машинного навчання // Вісник НУ «Львівська політехніка» – «Інформаційні системи та мережі». – 2019. №5. с. 40-52.
14. Khoma Y., Szmajda M., Pelc M. Development of scientific-methodological approaches of machine learning application in biosignals processing // Herald of Advanced Information Technology. 2020, Vol. 3, No.1. p. 383–394.

References

1. Cardiovascular diseases (CVDs). World Health Organization (WHO). URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-cvds>
2. V. A. Vizir, O. V. Demidenko, I. B. Prykhodko [ta in.]. - Elektrokardiografii. Funktsionalni EKH testy. Ambulatorne monitoruvannya EKH (za Kholterom) ta arterialnoho tysku: navch.-metod. posib. do praktychnykh zaniat z funktsionalnoi diahnostryky dlia studentiv 5 kursu medychnykh fakul'tetiv. U 3-kh ch. Ch. 1, - . - Zaporizhzhia, ZDMU, 2019. – 103 s.
3. Böck C. ECG Signal Analysis based on the Wavelet Transform : MASTER'S THESIS. Graz, 2015. 101 p.
4. Tverdokhlіb Yu. V. Metody ta informatsiina tekhnolohiia kompleksnoho otsiniuvannya parametriv veivlet-peretvorennia nestatsionarnykh syhnaliv : dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.13.06. Zaporizhzhia, 2018. 178 s.
5. Tsyfrova obrobka nyzkoamplitudnykh komponent elektrokardiosyhnaliv: Navch. posib/ N.H. Ivanushkina, K.O. Ivanko. — K.: NTUU “KPI”, 2014. — 182 c.
6. Obnaruzhenie infarkta miokarda s ispolzovaniem vejvlet analiza EKG signala, N.S. Davydov, A.G. Hramov, Nauki o dannyh s.2143-2148
7. Lagun I., Nakonechnyy A., Samoty V. "Using fuzzy logic to optimise the selection of mother wavelets" Krasow University of Technology, Technical Transactions, Issue 3, Volume 2018 ((115), 107 – 114pp.
8. Nakonechnyy A.I., Lahun I.I., Veres Z.Ie., Nakonechnyy R.A., Fedak V.I. «Teoriia i praktyka obrobлення syhnaliv u malokhvylovii (wavelet) oblasti» / Monohrafiia. – Lviv: Rastr – 7, 2020 – 470s.
9. Lahun I.I. Bahatokryterialna optymizatsiia vyboru bazovykh funktsii v protsesi malokhvylovoho peretvorennia syhnaliv / Lahun I.I., Nakonechnyy A.I. // Naukovyi zbirnyk Ukrainsoi akademii drukarstva “Kompiuterni tekhnolohii drukarstva” –Lviv. 2017. № 37- S.63 – 67
10. Surda, Jozef & Lovas, Stanislav & Pucik, Jozef & Jus, Milan. (2007). Spectral Properties of ECG Signal. 2007 17th International Conference Radioelektronika. 1-5. 10.1109/RADIOELEK.2007.371653.
11. Banerjee, Swati & Mitra, Madhuchhanda. (2014). Application of Cross Wavelet Transform for ECG Pattern Analysis and Classification. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on. 63. 326-333. 10.1109/TIM.2013.2279001.
12. Haque, A.K.M Fazlul & Ali, Hanif & Kiber, Md & Hasan, Md. Tanvir. (2009). Detection of small variations of ECG features using wavelet. Journal of Engineering and Applied Sciences. 4.
13. Khoma Yu.V. Klasyfikatsiia vibroartrografichnykh syhnaliv z vykorystanniam khvylykovoho peretvorennia i tekhnolohii mashynnoho navchannia // Visnyk NU «Lvivska politekhnika» – «Informatsiini systemy ta merezhi». – 2019. №5. s. 40-52.
14. Khoma Y., Szmajda M., Pelc M. Development of scientific-methodological approaches of machine learning application in biosignals processing // Herald of Advanced Information Technology. 2020, Vol. 3, No.1. p. 383–394.