

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
Міністерство освіти та науки України

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти та науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЧЕРНЕТЧЕНКО ДМИТРО ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 616-71:004.032.26

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОД ТА АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ОБРОБКИ
ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЧНИХ СИГНАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ
ШТУЧНИХ МУЛЬТИСТАБІЛЬНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**

05.11.17 – біологічні та медичні прилади і системи
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Д.В. Чернетченко

Науковий керівник Сніжко Євген Матвійович, кандидат технічних наук, доцент

Дніпро – 2019

АНОТАЦІЯ

Чернетченко Д.В. Метод та апаратно-програмний засіб обробки електрокардіографічних сигналів за допомогою штучних мультистабільних нейронних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.17 “Біологічні та медичні прилади і системи” – Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, МОН України, Дніпро. – Вінницький національний технічний університет, МОН України, Вінниця, 2019.

Серцево-судинні захворювання є глобальною проблемою або "глобальною епідемією" (дані за 2018 рік), захворюваннями, які викликають передчасну смертність майже 17 мільйонів людей щороку. Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ) визначено, що люди, які страждають від серцево-судинних захворювань або чутливі до ризику виникнення таких захворювань, потребують підвищеної уваги, для раннього виявлення передвісників хвороби (кардіокатастроф) та надання своєчасної кваліфікованої допомоги. Це, в свою чергу, зумовлює необхідність розроблення інструментальних засобів точної та швидкої реєстрації та автоматизованого аналізу електрокардіографічних (ЕКГ) сигналів в режимі реального часу. В той же час, все частіше для аналізу в реальному часі ЕКГ-сигналів, починають застосовувати штучні нейронні мережі, які виконують завдання класифікації і є основою для аналізу ЕКГ, для виявлення порушень серцевого ритму, ішемії міокарда, стенокардії та інших хронічних змін. Розробники медичної апаратури зацікавлені у нейронних структурах, які здатні реорганізовуватися у реальному часі без попереднього навчання. З огляду на стрімке розширення сфери застосування штучних нейронних мереж, дослідники звертають все більшу увагу на процеси у біологічних нейронах та нейронних структурах, які свого часу стали прототипами для цієї технології. Штучні моделі окремих нейронів, що здатні відтворювати спайкову (або імпульсну) поведінку біологічних

аналогів, як правило, називають спайковими нейронами, нейронні мережі – спайковими нейронними мережами. Спайкові штучні нейронні мережі здатні суттєво підвищити якість моніторингового контролю за станом пацієнта, ефективність автоматизованої діагностики, завдяки здатності виконувати задачі класифікації та розпізнавання. Виявлення комплексу P-QRS-T в ЕКГ-сигналі забезпечує фундаментальну можливість для виявлення всіх головних компонентів сигналу і подальшого автоматизованого аналізу та діагностування захворювань. Однак певні специфічні характеристики ЕКГ ускладнюють програмне виявлення форми ЕКГ: по-перше, це особливість морфології сигналів ЕКГ, що змінюється від людини до людини; по-друге, ЕКГ-сигнал досить часто має компоненти шуму різного походження. На сьогодні створення такої обчислювальної системи із низьким рівнем енергоспоживання, високою обчислюваною потужністю та здатністю точно виконувати детектування всіх головних ознак P-QRS-T-комплексу без додаткового калібрування, або індивідуального навчання для кожного пацієнта, залишається відкритим питанням. Автор вважає, що одним з перспективних виходів з цього технологічного глухого кута є нейроморфні апаратні модулі.

Дисертаційна робота присвячена розробці оригінального програмно-апаратного комплексу для автоматизованого моніторингу ризиків виникнення серцево-судинних захворювань методом реєстрації та аналізу ЕКГ-сигналів людини. Для цього, проведено аналіз сучасних програмних та апаратних рішень автоматизованого контролю фізіологічних параметрів стану здоров'я людини за допомогою ЕКГ-сигналів.

За допомогою сучасної теоретичної бази знань із засобів машинного навчання, запропоновано нову модель штучних нейронних моделей, яка використовується для ефективного вирішення задачі розпізнавання типових ознак ЕКГ-сигналів в режимі реального часу.

В дисертаційній роботі одержані такі нові наукові результати:

1. Вперше розроблено на основі спайкового шифратора вхідного сигналу, рекурентних нейронів внутрішнього шару та вихідних нейронів імпульсну

штучну нейронну мережу, яка представляє собою систему класифікації, що сама навчається та автоматично адаптується до змін вхідного сигналу і забезпечує тим самим оброблення в режимі реального часу клінічно-значущих випадків ЕКГ-сигналу всередині мережі.

2. Вперше розроблено метод оброблення ЕКГ-сигналу в SNN-мережі, який забезпечує збільшення щільності даних за рахунок безпосереднього кодування спайків в ЕКГ-сигналі, набуття мережею відповідних стабільних станів, які відповідають піковим моментам ЕКГ і зменшення помилки розпізнавання, що досягнуто попереднім обробленням і фільтрацією даних на вході нейронної мережі.

3. Удосконалено адаптовану модель імпульсного штучного нейрона шляхом надання йому електричної мультистабільності та здатності відтворювати патерни електричної активності біологічних об'єктів з одночасним розширенням пам'яті та збільшенням обчислювальної потужності, що зумовило її використання в якості базового компонента нейроморфного модуля.

4. Вперше висунуто гіпотезу, згідно якої нейронні структури із більшою кількістю стабільних станів спроможні генерувати більш складні патерни вихідної активності, що свідчить про можливість виконання в такій нейронній мережі обчислювань підвищеної складності.

5. Удосконалено модель структури спайкового шифратора шляхом точного кодування ЕКГ-сигналів, що створило необхідні і достатні передумови для побудови імпульсної штучної мережі і на її основі апаратно-програмного засобу для оброблення ЕКГ-сигналів.

Результати теоретичних та практичних досліджень, проведених в дисертаційній роботі мають практичну спрямованість та пройшли апробацію та впровадження у виробничий процес створення пристрою медичного призначення, а також застосовуються в освітньому та навчальному процесі.

Розроблено оригінальну модель штучного нейрону із біологічним ступенем подібності процесів та властивістю електричної мультистабільності.

Розроблено програмне забезпечення для синтезу та моделювання штучних нейронів із заздалегідь заданим числом станів стабільності, в роботі розглянуто приклади успішного синтезування нейронів із двома, трьома та чотирма стаціонарними станами стабільності. Показано, що нейронні структури із більшою кількістю стабільних станів здатні генерувати більш складні паттерни вихідної активності, а отже можуть виконувати більш складні обчислювання в складі системи обчислювальних одиниць – в нейронній мережі. Встановлені головні межі та умови застосування розробленої штучної моделі.

Головними перевагами розробленої моделі штучної нейронної мережі є велика обчислювальна потужність на ряду із реалізованою функцією пам'яті, а також можливість легкої апаратної реалізації за допомогою стандартного процесору із ПЛІС-архітектурою. Оригінальну модель штучного нейрона використано в контексті обчислювальної імпульсної нейронної мережі.

Розроблено штучну імпульсну нейронну мережу, що складається з основних одиниць: спайкового шифратора вхідного сигналу, рекурентних нейронів внутрішнього шару та вихідних нейронів мережі. Представлена нейронна мережа уявляє собою систему класифікації, що працює без вчителя та здатна адаптуватися під зміни вхідного сигналу в реальному часі без додаткової зміни чи втручання в систему. Спроектовано, змодельовано та реалізовано універсальну схему спайкового шифратора для оптимального та точного кодування сигналів електрокардіографічного походження для обробки нейронною мережею.

Виконано підбір сучасної елементної бази для реалізації схематехнічного рішення апаратної частини комплексу. Розроблено універсальну схему реєстрації ЕКГ-сигналу, або ЕКГ-фронтенд, що складається із аналогової схеми фільтрації сигналу з електродів, диференціального (інструментального) підсилювача та тракту фільтрації аналогового сигналу і адаптивної регуляції підсилення. Розроблено оригінальне програмне забезпечення для керування мікроконтролерним блоком та аналоговим ЕКГ-фронтендом. Розроблено

оригінальне вбудоване програмне забезпечення процесору із ПЛІС-архітектурою для апаратної реалізації штучної нейронної мережі, або нейроморфний модуль (нейро-модуль).

Розроблено повний пакет конструкторської документації для виготовлення опитного зразку пристрою для автоматизованої реєстрації та аналізу ЕКГ-сигналів. Спроектовано та виготовлено опитний зразок електронного приладу. Розроблено програмне забезпечення для ПК мовою програмування Python, для керування, зчитування та візуалізації даних з пристрою.

Розроблено методику і проведено валідацію показників точності розпізнавання QRS- і P-QRS-T-комплексів на реальних електрокардіограмах. Проведено валідаційні випробування та тестування отриманого приладу, з оцінки точності класифікації основних амплітудно-часових ознак ЕКГ-сигналу на вибірці записів з відкритої бази даних (MIT-BIH), а також в лабораторних умовах, на замірах з волонтерів за допомогою розробленого пристрою. В результаті яких встановлено, що середня похибка класифікації R-піків – 1.00 %; P-піків – 2.36 %; T-піків – 1.37 %, що є значно кращим показником ніж у сучасних діючих аналогів. Досліджено споживання енергії електронного пристрою. Випробування показали, що реалізоване рішення має у 1.25 менше споживання енергії, ніж у діючих сучасних рішень на базі спеціалізованих інтегральних схем (ASIC).

На базі інструментальних розробок та досліджень природи ЕКГ-сигналів було успішно впроваджено у виробництво носимий монітор варіабельності серцевого ритму (“SenseBand”), в якому здобувач виступав як виконавець. У співавторстві опубліковано два патенти в патентному відомстві США (United States Patent and Trademark Office). Результати дослідження впроваджено в науково-дослідну роботу та навчальний процес споріднених вищих навчальних закладів України.

Ключові слова: серцево-судинні захворювання, електрокардіограма, варіабельність серцевого ритму, штучні нейронні мережі, нейроморфні

комп'ютери, мікроконтролери, імпульсні нейронні мережі, моделі нейронів, мультистабільні нейрони.

ANNOTATION

Chernetchenko D.V. The method and hardware-software implementation of electrocardiac signals processing using artificial multistable neural networks. – Manuscript copyright.

Dissertation for obtaining the scientific degree of technical sciences candidate (PhD) in specialty 05.11.17 – “Biology and medical equipment and system” – Oles Honchar Dnipro National University, MES of Ukraine, Dnipro. – Vinnytsia National Technical University, MES of Ukraine, Vinnytsia, 2019.

Cardiovascular diseases (CVD) are global problem (“global epidemic”, 2018), that causes premature deaths of approximately over 17 million people every year. The World Health Organization (WHO) has identified that people who suffer from CVD or are sensitive to such diseases need special attention for early detection of precursors, provide early qualified assistance and mitigate cardio-vascular risks. This problem motivates to the development of tools for accurate and fast recording and automated analysis of electrocardiographic (ECG) signals in real-time. At the same time, artificial neural networks are often using for the analysis of ECG-signals in real-time, which perform the tasks of classification and are the basis for the detection of cardiac arrhythmias, myocardial ischemia, angina and other chronic changes. Medical device developers are interested in neural structures that are able to reorganize ECG in real-time without pre-training and supervising. Researchers are increasingly focusing on processes in biological neurons and neural structures that have become prototypes for this technology. Artificial models of individual neurons that can reproduce the spike (or impulse) behavior of their biological analogues are usually called spiking neurons. Spiking artificial neural networks (SNN) are able to significantly improve the quality of monitoring patient's control and the effectiveness of automated medical diagnostics, due of providing good signal's patterns classification accuracy. The detection of the P-QRS-T complex in ECG-signal

provides a fundamental opportunity to detect all major signal components and further automated analysis. However, specific characteristics of the ECG strongly complicate the detection process of the common components of the ECG-morphology. Firstly, the features of ECG-signals morphology strongly varies from person to person. Secondly, the ECG-signal often distorted because of the noises of different nature. Today the question of creation of a low-power and high performance computing portable system remains an open question. Author believes that the neuromorphic hardware modules are one of the most promising solution for this technological issue.

The dissertation project is related to the development of the original software and hardware complex for automated monitoring of the risks of CVD by the method of registration and analysis of ECG-signals.

The analysis of modern software and hardware solutions of automated control of physiological parameters of human's health with aim of ECG-signals were discovered. With the help of modern theoretical knowledge based on machine learning methodology, a new model of artificial neural models was proposed, which successfully used for effectively solution of the problem of recognizing of the typical ECG-signal features in real-time.

The following new research results were obtained in the dissertation:

1. The SNN was created for the first time, which is a self-learning classification system and automatically provide adaptation to the changes in the input signal and thus provides real-time processing for significant clinical cases of ECG-signal. Neuron network was developed on the basis of an input signal encoder, recurrent internal neurons layer and output readout neurons.

2. A new original method for ECG-signal processing in the SNN was developed for the first time, which provides data density increasing by directly encoding spikes within ECG-signal, and drive the network domains to the stabilization at the stable states that correspond to the peaks moments of ECG-singal. By the way, pre-processing and filtering data at the input of the neural network leads to the significant reducing error of P-QRS-T pattern recognition.

3. Adapted model of spiking neuron by providing it with electrical multistability and ability to reproduce the patterns of electrical activity of biological objects providing internal system memory and increase of processing power and used as a basic component for the neuromorphic module.

4. A hypothesis has been suggested that neural structures with more stable states are capable of generating more complex patterns of output activity, which leads to the possibility to process more complex calculations in a neural network.

5. The model and structure of the ECG-signal encoder was improved by precise temporal coding of ECG-signals, which created the necessary and sufficient prerequisites for the construction of SNN and basis for hardware and software solution for ECG-signals processing.

The results of theoretical and practical research of the dissertation have a clear practical orientation and have been tested and implemented in the development and mass production of medical devices, as well as applied in the educational and research process.

The original model of artificial neuron with biological complexity of processes and the property of electric multistability was developed. The model described using a formal mathematical apparatus, and has analytical solutions for the case of piecewise linearized function of neuronal activation. Software for the synthesis and modeling of artificial neurons with a predetermined number of stability states was developed. Examples of successful synthesis of neurons with two, three, and four stationary stability states were considered. It is shown that the neuronal structures with more number of stable states are capable to generate more complex patterns of output electrical activity, and therefore can perform more complex calculations within the system of computing units. The main limits and conditions of application of the developed artificial model were established.

The main advantages of the developed model of the SNN: high computing power, which is necessary for real-time signals processing, implemented memory function, as well as the possibility of easy hardware implementation with a microprocessor based on FPGA architecture.

The original model of an artificial neuron is used in the context of the computational SNN. An SNN has been developed and consisting of the main units: the spiking coder of the input signal, the recurrent neurons of the internal layer and the output readout neurons of the network.

The universal schematic of the spiking encoder for optimal and accurate coding of ECG-signals processing by a neural network was designed, successfully simulated and implemented. The presented neural network represents a classification system that works without a teacher and is able to adapt to the changes in the input signal in real-time without any additional reorganization and supervising.

The universal scheme of registration of an ECG-signal is developed. Electrical schematic consist of an input analog circuit for the electrodes signal filtering and patient protection (ECG-frontend), a differential (instrumental) amplifier, input signal automatical gain controlling, filtering tract and main microcontroller unit. A complete package of technical documentation for the production of a device prototype of the automated ECG-signals registration and analysis was developed. A sample of an electronic device prototype was designed and manufactured. The original embedded software for controlling the microcontroller and processor with FPGA architecture for the hardware implementation of the artificial neural network (neuro-module) has been developed. Artificial neural model was successfully optimized for effective hardware platform based on FPGA architecture. Desktop software for PC platform with aim of the Python programming language was developed for control, reading and visualization raw-data from the device.

For testing the accuracy of classification of the basic amplitude-time characteristics of the ECG-signal in real-time respective validation tests and testing of the complex were carried out. Method and electronic device validated on ECG-signals samples from an open Physionet database (MIT-BIH), as well as in laboratory conditions for volunteers. The accuracy of the system is investigated, the average error of classification of R peaks is 1.0 %; P-peaks – 2.36 %; T-peaks – 1.37 %, which are a significantly better than for current electronic analogues in production. Energy consumption of the electronic device was discovered and shown that

implemented solution has 1.25 less energy consumption than solutions based on application-specific integral circuits elements (ASIC).

Commercial product was successfully implemented (also known as SenceBand) is cardiac heart rate variability (HRV) monitor, which is based of instrumental development and research of the dissertation work. Also, co-authored of two patents at United States Patent and Trademark Office (USPTO). The research results are implemented in the research work of related higher educational institutions of Ukraine.

Key words: cardiovascular diseases, electrocardiogram, heart rate variability, artificial neural networks, neuromorphic computers, microcontrollers, spiking neural networks, neuron models, multistable neurons.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] Є.М. Сніжко, Д. В. Чернетченко, “Динаміка електричних потенціалів моделі мережі нейронів із нелінійними функціями активації”, *Вісник Дніпропетровського університету. Фізика. Радіоелектроніка*, т. 20, № 2(19), с. 50-57, 2012.

[2] М. М. Милых, Е. М. Снежко, И. В. Тимченко, и Д. В. Чернетченко, “Реализация алгоритмов преобразования АДМ-ИКМ в системах автоматики и передачи данных”, *Гірничя електромеханіка та автоматика*, № 2 (93), с. 72-76, 2014.

[3] Є. М. Сніжко, М. М. Мілих, М. П. Моцний, та Д. В. Чернетченко, “Мобільна система для вимірювання кольорових характеристик об’єктів”, *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*, № 14, с. 102-106, 2017.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

[4] Y. M. Snizhko, O. O. Boiko, N. P. Botsva, D. V. Chernetchenko, and M. M. Milykh, “Methods for increasing the accuracy of recording the parameters of

the cardiovascular system in double-beam photoplethysmography”, *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, vol. 9(3), pp. 335-339, 2018.

[5] Д. В. Чернетченко, М. М. Мілих, та К. В. Луданов, “Апаратна реалізація імпульсної штучної нейронної мережі для детектування параметрів електрокардіографічного сигналу (ЕКГ)”, *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 4(275), с. 126-133, 2019.

[6] D. V. Chernetchenko, “A Novel Method of Preprocessing and Spike Encoding of Electrocardiographic Signal for Multi-stable Spiking Neuronal Networks Application”, *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського, Серія технічні науки*, т. 30(69), № 3, ч. 1, с. 191-199, 2019.

[7] Д. В. Чернетченко, М. П. Моцний, Н. П. Боцьва, О. В. Єліна та М. М. Мілих, “Автоматизована система реєстрації біоелектричних потенціалів”, *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія, екологія*, т. 21(2), с. 70-75, 2013.

[8] S. M. Korogod, and D. V. Chernetchenko, “Nature of electrical tristability in a neuron model with bistable asymmetrical dendrites”, *Neurophysiology*, vol. 40, no. 5/6, pp. 412-416, 2008.

[9] N. Botsva, I. Naishtetik, L. Khimion, and D. Chernetchenko, “Predictors of aging based on the analysis of heart rate variability”, *Pacing Clinical Electrophysiology*, vol. 40(11), pp. 1269-1278, 2017.

[10] D. V. Chernetchenko, R. S. Romaniuk, D. Sawicki, and G. Yusupova, “Analysis of electrical patterns activity in artificial multi-stable neural networks”, *Proceedings of SPIE –The International Society for Optical Engineering*, 7 p., 2019.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[11] Т. Tkachenko, N. Botsva, Т. Komendar, and D. Chernetchenko, “Autonomous hardware-software complex for biosignals registration and processing”, на *III Всеукр. наук.-практ. конф. Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп’ютерних систем (MEICS – 2018)*, Дніпро, 2018, с. 95-96.

[12] A. Lavrenjuk, D. Chernetchenko, N. Botsva, and K. Pustova, “Blood pressure monitoring”, in *Proc. XIII Międzyn. nauk.-prakt. konf. Naukai Inowacja – 2017*, Przemysł, 2017, pp. 53-55.

[13] K. Pustova, D. Chernetchenko, N. Botsva, and A. Lavrenjuk, “Non-invasive monitoring tools for automatic stress detection”, in *Proc. XIII Mezin. věd.-prakt. konf. Zprěvy VědeckéIdeje–2017*, Praha, 2017, pp. 21-23.

[14] Д. В. Чернетченко, Д. І. Золотова, Н. П. Боцьва, Е. М. Гасанов, та В. С. Олійник, “Автономний апаратно-програмний комплекс реєстрації та обробки кардіографічних сигналів”, in *Proc. XIII Int. scientific and pract. conf. Cutting-Edge Science – 2016*, Sheffield, 2016, pp.113-116.

[15] Д. В. Чернетченко, Е. М. Гасанов, Д. І. Золотова, та В. С. Олійник, “Апаратно-програмний комплекс реєстрації міографічних сигналів на базі мікроконтролера”, in *Proc. XII Mezin. věd.-prakt. konf. Efektivní nástroje moderníchvěd – 2016*, Praha, 2016, pp. 23-26.

[16] М. П. Моцний, Д. В. Чернетченко, Н. П. Боцьва, та О. В. Єліна, “Реєстрація біоелектричних потенціалів засобами комплексної автоматизованої системи”, in *Proc. X Mezin. věd.-prakt. konf. Veda a technologie: krok do budoucnosti– 2014*, Praha, 2014, pp. 102-105.

[17] С. В. Тимчик, С. М. Злепко, І. О. Криворучко, та Д. В. Чернетченко, “Професійне здоров’я людини і психічна, фізіологічна і клінічна складові”, на *Міжнар. наук.-практ. конф. Сучасні наукові дослідження у психології та педагогіці – прогресс майбутнього*, Одеса, 2019, с. 45-48.

[18] Д. В. Чернетченко, Д. І. Золотова, Е. М. Гасанов, та В. С. Олійник, “Комплекс реєстрації та обробки біопотенціалів на базі мікроконтролера”, in *XII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji Perspektywiczne Opracowania Sa Nauka i technikami – 2016*, Przemysl, 2016, pp. 77-80.

[19] D. V. Chernetchenko, T. A. Botsva, “Method of registering the intervals between adjacent R-peaks of the ECG signal with the one hand in order to diagnose and assess the state of the human body and Heart Rate Variability wearable monitoring device”, *U.S. Patent and Trademark Office, US20180242858A1*, 2018.

[20] D. V. Chernetchenko D.V., T. A. Botsva, “Method and apparatus for cuff less blood pressure monitoring based on simultaneously measured ECG and PPG signals designed in wristband form for continuous wearing”, *U.S. Patent and Trademark Office, US20190059752A1*, 2019.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	17
ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ, МОДЕЛЕЙ ТА АПАРАТНО-ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗІОЛОГІЧНИХ СИГНАЛІВ, ЗОКРЕМА ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ	26
1.1 Особливості комп'ютерного аналізу ЕКГ-сигналу	26
1.2 Аналіз моделей штучних мультистабільних нейронів	28
1.2.1 Активні електричні характеристики нейронів	34
1.2.2 Локальні вольт-амперні характеристики компартментів моделей нейронів	39
1.2.3 Електричні профілі трансмембранного потенціалу дендритів мультистабільних нейронів	42
1.3 Оцінювання наявних апаратно-програмних засобів для аналізу ЕКГ- сигналу	50
Висновки до 1-го розділу	54
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СТВОРЕННЯ НЕЙРОМОРФНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЧНИХ СИГНАЛІВ	55
2.1 Передумови застосування штучних мультистабільних нейронних мереж для розроблення нейроморфного модуля	55
2.1.1 Модель імпульсної штучної нейронної мережі (SNN)	62
2.1.2 Моделювання імпульсних режимів генерації мультистабільних нейронів	67
2.2 Розроблення структури і змісту моделі нейрону та нейронної мережі на VHDL	71

	16
2.2.1 Розроблення структури імпульсних нейронів та мережі SNN для FPGA-архітектури	71
2.2.2 Побудова оптимізованої моделі імпульсного штучного нейрона (ІШН)	73
2.2.3 Особливості архітектури та дизайну ІШН	75
2.2.4 Симуляція поведінки ІШН	80
2.2.5 Емуляція роботи нейронної мережі нейромодуля	82
2.3 Впровадження властивості мультистабільності імпульсних штучних нейронів для апаратної реалізації	84
2.4 Моделювання роботи нейроморфного модуля на базі FPGA	88
Висновки до 2-го розділу	92
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЧНИХ СИГНАЛІВ	94
3.1 Вибір платформи для розроблення нейроморфного модуля	94
3.2 Розроблення архітектури і структурної схеми засобу	99
3.3 Схемотехнічні рішення АПЗ на рівні схеми електричної принципової	101
3.4 Розроблення алгоритмічно-програмного забезпечення засобу	110
3.4.1 Вбудоване програмне забезпечення мікроконтролера	110
3.4.2 Попередня фільтрація та оброблення сигналу	113
3.4.3 Алгоритм детектування QRS- і P-QRS-T комплексів	116
Висновки до 3-го розділу	118
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АПРОБАЦІЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО ЗАСОБА І МЕТОДА	120
4.1 Вибір та обґрунтування методики валідації даних	120
4.1.1 Валідація результатів амплітудно-частотного детектування QRS- комплексу ЕКГ-сигналу з використанням SNN і референтного методу	121
4.1.2 Валідація результатів класифікації головних параметрів P-QRS-T-комплексу ЕКГ-сигналу	129

4.1.3	Валідація результатів детектування P-QRS-T-комплексу ЕКГ-сигналу за допомогою SNN	131
4.2	Порівняльний аналіз розробленого АПЗ та аналогів	134
	Висновки до 4-го розділу	136
	ВИСНОВКИ	138
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	140
	ДОДАТКИ	150
	Додаток А Список публікацій здобувача за темою дисертації	151
	Додаток Б Акти впровадження	154
	Додаток В Патенти на корисні моделі	159
	Додаток Г Проект програмного забезпечення мікроконтролеру STM32L151C8T6	161
	Додаток Д Проект програмного забезпечення ПК для візуалізації та запису вхідних даних	191
	Додаток Е Проект програмного забезпечення в середовищі Matlab для моделювання спайкового кодування ЕКГ-сигналів та симуляції поведінки нейронної мережі	219
	Додаток Є Проект програмного забезпечення в середовищі Matlab для фільтрації та детектування QRS-комплексів ЕКГ	222

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Серцево-судинні захворювання (ССЗ) є глобальною проблемою або "глобальною епідемією", що за даними всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) [1], викликають передчасну смерть 17 мільйонів людей щороку. Статистика American Heart Association свідчить, що від ССЗ щодня помирають приблизно 2300 американців і в середньому кожні 38 секунд для однієї людини фіксується одна кардіокатастрофа (інсульт, інфаркт, тощо)[2]. Серцево-судинні захворювання створюють значне навантаження на економіку країни і потребують значних коштів на їх діагностику і лікування.

Нижче наведено графік (рис. 1), який демонструє динаміку смертності на 100 тис. населення від ССЗ у чоловіків до 65 років у чотирьох колишніх радянських країнах: Росії, Казахстані, Україні та Білорусі. Графік починається з 1980 року і продовжується до 2015 року [2].

ВООЗ визначено [1], що люди, які страждають на ССЗ або чутливі до ризику виникнення таких захворювань (за наявності одного або декількох факторів ризику, таких як підвищений кров'яний тиск, діабет, гіперліпідемія тощо), потребують підвищеної уваги, раннього виявлення передвісників хвороби та надання своєчасної кваліфікованої допомоги. Це, в свою чергу, зумовлює необхідність розроблення інструментальних засобів реєстрації та автоматизованого аналізу електрокардіографічних сигналів в режимі реального часу для передбачення та завчасного попередження ризиків виникнення ССЗ та кардіокатастроф [72]. Водночас, існуючі засоби для точного інструментального аналізу і моніторингу залишаються або досить дорогими рішеннями з недостатньою зручністю їх використання у повсякденному житті, або потребують перенесення основних обчислювальних операцій на окрему серверну частину. Це призводить до залежності таких систем від наявності та якості Інтернет-зв'язку з "хмарою", отже до їх неспроможності своєчасно забезпечити миттєву реакцію лікаря на сигнал від пацієнта про проблеми зі

здоров'ям [74], [77]. Наведена аргументація додатково підтверджує актуальність теми дисертаційного дослідження і необхідність розроблення апаратно-програмного комплексу для реєстрації та автоматизованого аналізу електрокардіографічних сигналів на базі штучних нейронних мереж [72].

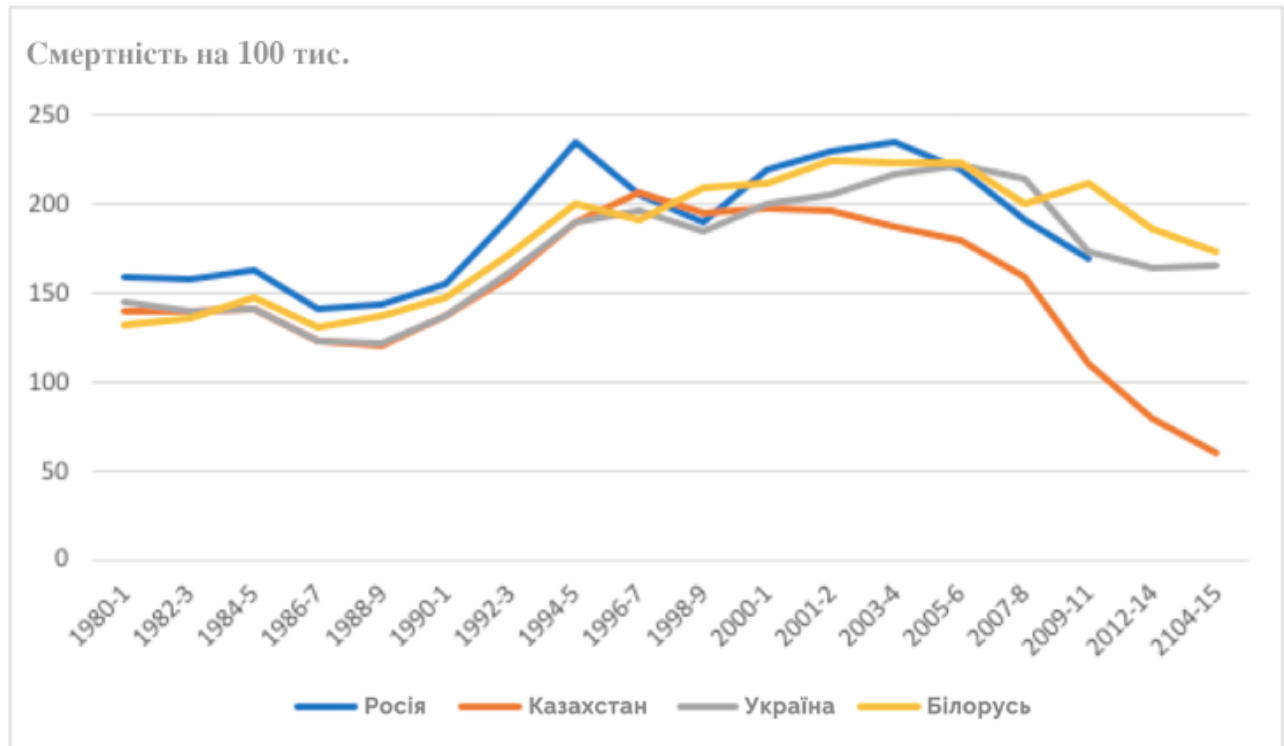


Рисунок 1 – Статистика смертності від ССЗ з 1980 по 2015 роки у країнах колишніх республік СРСР: Росії, Казахстані, Україні, Білорусі [2]

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась відповідно до договору науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт для ТОВ “Науково-виробниче підприємство “СМД” (акт впровадження №11/09 від 11.09.2018), а також згідно з планом науково-дослідної роботи Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара “Дослідження принципів обробки інформації та управління в біомедичних та технічних системах” (№ держреєстрації 0116U003588), в яких здобувач брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в підвищенні ефективності оброблення та точності детектування головних ознак P-QRS-T-

комплексу ЕКГ-сигналів шляхом розроблення методу та апаратно-програмного засобу на основі штучних мультистабільних нейронних мереж.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання:

1. Узагальнити та проаналізувати наявні методи та апаратно-програмні засоби для оброблення ЕКГ-сигналів.
2. Розробити адаптовану модель імпульсного штучного нейрона і визначити обмеження на її застосування у складі нейронної мережі.
3. Розробити референтний метод оброблення та детектування головних ознак ЕКГ-сигналу (Р-, Q-, R-, S-, Т-зубці та відповідні інтервали).
4. Розробити структурну схему і на її основі – апаратно-програмний засіб для оброблення ЕКГ-сигналів.
5. Запропонувати схемо-технічну реалізацію апаратного забезпечення засобу.
6. Обґрунтувати вибір та адаптувати методику валідації показників точності розпізнавання структурних комплексів ЕКГ-сигналу до умов дисертаційного дослідження.
7. Провести експериментальне дослідження та апробацію розробленого апаратно-програмного засобу.

Об'єкт дослідження – процес оброблення ЕКГ-сигналу із застосуванням штучних мультистабільних нейронних мереж.

Предмет дослідження – модель штучного нейрона, референтний метод та апаратно-програмний засіб для оброблення ЕКГ-сигналу.

Методи дослідження. Для оброблення даних застосовували методи дискретного оброблення інформації і математичної статистики; розроблення структурної схеми та апаратно-програмного засобу виконано на базових принципах системного підходу; для розроблення моделі нейронів та нейронних мереж використовували методи математичного моделювання, штучного інтелекту і програмні пакети NEURON та Matlab; програмне забезпечення побудовано з використанням середовища проектування IAR Embedded Workbench, мови програмування VHDL та пакету Xilinx ISE WebPack;

проектування схемо-технічного рішення та розробку друкованої плати апаратного засобу реалізовано за допомогою системи автоматизованого проектування Altium Designer; використано бібліосемантичний метод для вивчення вітчизняного та світового контенту.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому що:

1. Вперше розроблено на основі спайкового шифратора вхідного сигналу, рекурентних нейронів внутрішнього шару та вихідних нейронів імпульсну штучну нейронну мережу, яка представляє собою систему класифікації, що сама навчається та автоматично адаптується до змін вхідного сигналу і забезпечує тим самим оброблення в режимі реального часу клінічно-значущих випадків ЕКГ-сигналу всередині мережі.

2. Вперше розроблено метод оброблення ЕКГ-сигналу в SNN-мережі, який забезпечує зниження щільності даних за рахунок безпосереднього кодування спайків в ЕКГ-сигналі, набуття мережею відповідних стабільних станів, які відповідають піковим моментам ЕКГ і зменшення помилки розпізнавання, що досягнуто попереднім обробленням і фільтрацією даних на вході нейронної мережі.

3. Удосконалено адаптовану модель імпульсного штучного нейрона шляхом надання йому електричної мультистабільності та здатності відтворювати патерни електричної активності біологічних об'єктів з одночасним розширенням пам'яті та збільшенням обчислювальної потужності, що зумовило її використання в якості базового компонента нейроморфного модуля.

4. Вперше висунуто гіпотезу, згідно якої нейронні структури із більшою кількістю стабільних станів спроможні генерувати більш складні патерни вихідної активності, що свідчить про можливість виконання в такій нейронній мережі обчислювань підвищеної складності.

5. Удосконалено модель структури спайкового шифратора шляхом точного кодування електрокардіографічних сигналів, що створило необхідні і

достатні передумови для побудови імпульсної штучної мережі і на її основі апаратно-програмного засобу для оброблення ЕКГ-сигналів.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Обґрунтовано вибір сучасної елементної бази для схемо-технічної реалізації апаратного забезпечення засобу, що забезпечило розроблення ЕКГ-фронтенду (універсальної схеми реєстрації ЕКГ-сигналу), схеми аналогової фільтрації та адаптивного регулювання підсилювання вхідного сигналу, що надходить з ЕКГ-електродів та інструментального підсилювача, який керується вбудованим в мікроконтролер програмним забезпеченням.

2. Запропоновано оригінальний засіб, інструментальні елементи та дослідження якого лягли в основу двох патентів США і на його основі розроблено і виготовлено дослідний зразок апаратно-програмного засобу з комплектом конструкторської документації для подальшого дрібносерійного виробництва.

3. Розроблено методику і проведено валідацію показників точності розпізнавання QRS- і P-QRS-T-комплексів на реальних електрокардіограмах. Проведено валідаційні випробування та тестування отриманого приладу, з оцінки точності класифікації основних амплітудно-часових ознак ЕКГ-сигналу на вибірці записів з відкритої бази даних (MIT-BIH), а також на волонтерах при реальному використанні апаратного засобу. Проведено оцінювання показників точності розпізнавання QRS- і P-QRS-T, в результаті було показано, що похибка детектування не перевищує 1 % для R-зубця; 2.36 % для P-зубця і 1.37 % для T-зубця, що суттєво краще ніж у діючих аналогів.

4. Результати дисертаційної роботи впроваджено у виробничий процес на підприємстві ТОВ “Науково-виробниче підприємство СМД” – акт впровадження №11/09 від 11.09.2018 р.), що дозволило оптимізувати технічні рішення в приладі для реєстрації та аналізу ЕКГ з зап’ястя людини, і навчальний процес кафедри експериментальної фізики та фізики металів Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара (акт впровадження від 10.04.2019 р.), що сприяло поглибленню знань студентів в

напрямку створення вбудованих систем та підвищило якість викладання відповідних дисциплін.

Особистий внесок здобувача. Всі результати наукових і практичних досліджень, що увійшли до дисертаційної роботи, отримані і розроблені автором особисто. Особистий внесок здобувача в працях, написаних у співавторстві, полягає в наступному: в [1] розглянуто розробку та дослідження електричної поведінки штучної нейронної мережі, що базується на мультистабільних нейронних моделях; в [2] запропоновано новий цифровий метод адаптивної модуляції та фільтрації сигналів в реальному часі за допомогою апаратної структури програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) на прикладі Spartan 3E від Xilinx; в [3] запропоновано метод та портативну апаратну реалізацію системи розпізнавання та обробки даних від сенсорів (світлові сенсори) у реальному часі на базі методів цифрової фільтрації та машинного навчання із використанням штучних нейронних мереж; в [4] наведено методику підвищення ефективності оцінки фізіологічного стану кардіо-васкулярної системи людини, за допомогою методу двох-променевої фото-плетизмографії (ФПГ), запропоновано новий підхід до детектування максимумів (піків) ФПГ сигналу людини в реальному часі, реалізовано апаратний комплекс на базі біосенсору від Maxim Dallas та мікроконтролерної платформи STM32; в [5] розроблено та протестовано апаратну реалізацію мультистабільної нейронної мережі для вирішення задачі розпізнавання та класифікації QRS-комплексів ЕКГ-сигналу; в [7] розроблено апаратно-програмний комплекс автоматизованої системи реєстрації біоелектричних потенціалів на базі USB-пристрою, з подальшою обробкою цифрових сигналів на ЕОМ; в [8] проведено аналіз та запропоновано методику розробки математичної моделі мультистабільних нейронів як головних структурних одиниць, що мають властивості пам'яті та здатні генерувати складні імпульсні (спайкові) послідовності сигналів; в [9] запропоновано нову методику оцінки біологічного віку людини за станом кардіо-васкулярної системи із застосуванням методів аналізу варіабельності серцевого ритму

(BCP) та методів машинного навчання за допомогою штучних нейронних мереж; в [10] проведено детальний аналіз мультистабільних штучних нейронних мереж на математичній моделі, показано різні імпульсні режими роботи та структурні передумови для виникнення складних паттернів електричної активності у мережах; в [11] приведена апаратна реалізація автономного та безпроводового комплексу для реєстрації фізіологічних параметрів людини (електрокардіографічних та електроміографічних (ЕМГ) потенціалів людини); у [12] розглянуто методику оцінки стану кардіо-васкулярної системи людини та безманжетної оцінки артеріального тиску за допомогою аналізу ЕКГ та ФПГ сигналів людини, розроблено програмно-апаратний комплекс для автоматизованої оцінки артеріального тиску; в [13] приведена реалізація методики та апаратно-програмний комплекс для оцінки функціонального стану оператора, а саме параметрів стресу та відновлення автономної нервової системи, за допомогою методів BCP за ЕКГ-сигналом; в [14] реалізовано програмно-апаратний комплекс для віддаленої реєстрації та аналізу ЕКГ- сигналів (детектування P-QRS-T комплексів) за допомогою безпроводової технології Bluetooth 4.0 та мікроконтролерної платформи Arduino; в [15] реалізовано програмно-апаратний комплекс для віддаленої реєстрації та аналізу амплітудно-частотних параметрів ЕМГ сигналів пацієнта за допомогою безпроводової технології Bluetooth 4.0 та мікроконтролерної платформи Arduino; в [16] розроблено програмно-апаратний комплекс для дослідження впливів оточуючого середовища на біопотенціали; в [17] запропоновано підхід для оцінювання процесів взаємодії особистості з інформаційними системами і комплексами в умовах зовнішнього середовища без безпосереднього спостереження за об'єктами управління; в [18] розроблено універсальний аналогово-цифровий портативний мікроконтролерний пристрій для неінвазійної реєстрації біопотенціалів людини; в [19] наведено опис нової методики реєстрації R-піків ЕКГ-сигналу за допомогою портативним носимим мікропроцесорним пристроєм в реальному часі, та оцінки фізіологічного стану за допомогою аналізу BCP; в [20] наведено опис нової методики оцінки

артеріального тиску пацієнта за допомогою портативного носимого мікропроцесорного пристрою в реальному часі.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення роботи викладено та обговорено на науково-практичних конференціях різного рівня: III Всеукраїнській НПК “Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп’ютерних систем (MEICS-2018)” (м. Дніпро, 2018 р.); XIII МНПК “Nauka i Inowacjia – 2017” (м. Пшемисль, Польща, 2017 р.); XIII МНПК “Zprěvy Vědecké Ideje–2017” (м. Прага, Чехія, 2017 р.); XII Міжнародній науковій і практичній конференції “Cutting-Edge Science – 2016” (м. Шеффілд, Велика Британія, 2016 р.); XII МНПК “Efektivní nástroje moderních věd – 2016” (м. Прага, Чехія, 2016 р.).

Публікації. Результати досліджень відображені в 20-и публікаціях: з них 5-ть статей у наукових фахових виданнях України з технічних наук ([1] – [3], [5], [6]), 3-и статті в закордонних виданнях ([8] – [10]), 2-і статті в інших виданнях ([4], [7]), всі 10-ь статей індексуються в міжнародних наукометричних базах даних; 8-м матеріалів і тез доповідей конференцій ; 2-а патенти ([19], [20]).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 230 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 7 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 125 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 7 таблицями, 66 рисунками. Список використаних джерел містить 101 найменування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Статистичні доклади ВОЗ - World Health Organization, 2019 р. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.who.int/countries/ukr/ru/>

[2] Міністерство охорони здоров'я (МОЗ) України, 2019 р. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://moz.gov.ua>

[3] Скнар И.И., “Концепция построения биологически правдоподобной искусственной нейронной сети”, *Нейро-нечіткі технології моделювання в економіці*, Київ: КНЕУ, Т.3., с. 188-218, 2014.

[4] О.К. Колесницький, С.М. Богатчук, М.В. Крещенецька та С.С. Яремчук “Моделювання імпульсної нейронної мережі у задачі розпізнавання багатовимірних імпульсних послідовностей”, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, №5, с. 62-66, 2008.

[5] О. К. Колесницький, “Аналітичний огляд апаратних реалізацій спайкових нейронних мереж”, *Математичні машини і системи*, № 1, с. 3-19, 2015.

[6] Тимощук П. В. “Імпульсна нейронна мережа типу “K-WINNERS-TAKE-ALL”, *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. Серія: Автоматика, вимірювання та керування, Львів : Видавництво Львівської політехніки, № 880, с. 41-43, 2017.

[7] Тимощук П. “Аналогова нейронна схема ідентифікації найбільших за величиною з множини сигналів з невідомого діапазону”, *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології : збірник наукових праць, № 826, с. 3-8, 2015.

[8] S. Shatnyi and P Tymoshchuk, “Hardware implementation of discrete-time neural circuit of largest/smallest signal identification”, in *Proc. of the XIIIth Int. Conf. “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics”*, L’viv-Polyana, Ukraine, pp. 226-230, 2015.

[9] P. Tymoshchuk and S. Shatnyi, “A hardware implementation of neural circuit of maximal/minimal value discrete-time signal identification”, *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. Серія: Комп’ютерні системи проектування теорія і практика: збірник наукових праць, №828. с. 27-34, 2015.

[10] В.Ф. Бардаченко, О.К. Колесницький та С.А.Василецький, “Перспективи застосування імпульсних нейронних мереж з таймерним представленням інформації для розпізнавання динамічних образів“, *Управляющие системы и машины*, №6, с. 73-82, 2003.

[11] О. К. Колесницький та Самра Муавия Хамо, “Метод распознавания многомерных временных рядов при помощи импульсных нейронных сетей”, *Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія*, №2(6), с. 86-93, 2006.

[12] А. И. Галушкин А.И., “Нейрокомпьютеры: учебн. пособ. для вузов“ – М.: ИПРЖР, 2000. – Кн. 3. – 528 с.

[13] Бардаченко В.Ф., Колесницький О.К. та Василецький С.А., “Таймерні нейронні елементи та структури”, Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, с. 126, 2005.

[14] Machine learning explained: Understanding supervised, unsupervised, and reinforcement learning [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bigdata-madesimple.com/machine-learning-explained-understanding-supervisedunsupervised-and-reinforcement-learning/>.

[15] Cybenko G. “Approximation by superpositions of a sigmoidal function”, *Mathematics of Control, Signals and Systems*, p. 117, 1989.

[16] С. И. Лукаш, О. К. Колесницький и И. Д. Войтович “Техника и технология анализа объектов для экологической и медицинской диагностики по запаху”, *Комп’ютерні засоби, мережі та системи*, №5, с.141-148, 2006.

[17] Maass W. “Networks of spiking neurons: the third generation of neural network models”, *Neural Networks*, N 10., pp. 1659-1671, 1997.

[18] Wilson, P., Metcalfe, B., Graham-Harper-Cater, J., and Bailey, J. A., “A reconfigurable architecture for real-time digital simulation of neurons” in *Intelligent Systems Conference*, 2017.

[19] Kappel D., Nessler B., and Maass W. “STDP Installs in Winner-Take-All Circuits an Online Approximation to Hidden Markov Model Learning” *PLoS Comput. Biol.*, Vol. 10., № 3, 2014.

[20] R.R. Borges et.al., “Effects of the spike timing- dependent plasticity on the synchronization in a random Hodgkin-Huxley neuronal network”, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Elsevier B.V., pp. 12-22, 2015.

[21] J. A. Henderson, T. A. Gibson, and J. Wiles. *Spike Event Based Learning in Neural Networks*, 2015.

[22] Bishop C. “Neural Networks for Pattern Recognition”, 1995.

[23] Ayodele T. “Types of Machine Learning Algorithms”, *New Advances in Machine Learning*, 2010.

[24] S. M. Korogod, and D. V. Chernetchenko, “Nature of electrical tristability in a neuron model with bistable asymmetrical dendrites”, *Neurophysiology*, vol. 40, no. 5/6, pp. 412-416, 2008.

[25] Є. М. Сніжко, та Д. В. Чернетченко, “Динаміка електричних потенціалів моделі мережі нейронів із нелінійними функціями активації”, *Вісник Дніпропетровського університету. Фізика. Радіоелектроніка*, т.20, № 2(19), с. 50-57, 2012.

[26] Diehl P.U., Neil D., Binas, J., Cook M., Liu S.C., and Pfeiffer M. “Fast-Classifying, High-Accuracy Spiking Deep Networks Through Weight and Threshold Balancing”, *Proc. of IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2015.

[27] E. M. Izhikevich, “Simple model of spiking neurons”, *IEEE Transactions on neural networks*, 14 (6), 1569-1572, 2003.

[28] Y. Loewenstein, S. Mahon, P. Chadderton, K. Kitamura, H. Sompolinsky, and Y. Yarom, M. Häusser, “Bistability of cerebellar Purkinje cells modulated by sensory stimulation”, *Nat Neurosci.*, 8, No.2, pp. 202-211, 2005.

[29] M. Mynlieff, and K. G. Beam, “Characterization of voltage-dependent calcium currents in mouse motoneurons”, *J. Neurophysiol.*, 68, No. 1, pp. 85-92, 1992.

[30] P.C. Schwindt, and W. E. Crill, “Amplification of synaptic current by persistent sodium conductance in apical dendrite of neocortical neurons”, *J. Neurophysiol.*, 74, No. 5, pp. 2220-2224, 1995.

[31] S.M. Korogod, I.B. Kulagina, J. Durand, and S. Tyc-Dumont, “Electrical multistability of the dendritic arborization receiving tonic NMDA activation: a simulation study on reconstructed abducens motoneuron,” *3rd Forum of European Neuroscience, Paris, Palais des Congrès, July 13-17, FENS Abstr*, V.1, A058.9, 2002.

[32] Smon Haykin, *Neural Network: A Comprehensive Foundation*, 2nd Ed, Pearson Publication, 2005.

[33] S.M. Korogod, and I.B. Kulagina, “Electrical bistability in a neuron model with monostable dendritic and axosomatic membrane,” *Neirofiziologija/Neurophysiology*, 32, No. 2, pp. 98-101, 2000.

[34] M. Hines, “NEURON – a program for simulation of nerve equations”, *in: Neural Systems: Analysis and Modeling*, F. Eeckman (ed.), Kluwer Acad. Publ., Norwell MA, pp. 127-136, 1993.

[35] L. Brodin, H. G. C. Traven, and A. Lansner, “Computer simulation of N-methyl-D-aspartate (NMDA) receptor-induced membrane properties in a neuron model”, *J. Neurophysiol.*, 66, pp. 473-484, 1991.

[36] Destexhe, A. Babloyantz, A., and Sejnowski, T. J. “Ionic mechanisms for intrinsic slow oscillations in thalamic relay neurons”, *Biophys. J.* 65, pp. 1538-1552, 1993.

[37] Rinzel, J., and Ermentrout, B. “Methods in Neuronal Modelling: From Synapses to Networks”, 1998.

[38] Victoria Booth, John Rinzel, and Ole Kiehn “Compartmental Model of Vertebrate Motoneurons for Ca^{2+} -Dependent Spiking and Plateau Potentials Under Pharmacological Treatment”, *J Neurophysiol*, 78, pp. 3371-3385, 1997.

[39] Rinzel J., and Ermentrout B. “Methods in Neuronal Modelling: From Synapses to Networks”, *Cambridge: MIT Press*, pp. 40-62, 1998.

[40] Booth V., Rinzel J., and Kiehn O. “Compartmental Model of Vertebrate Motoneurons for Ca^{2+} -Dependent Spiking and Plateau Potentials Under Pharmacological Treatment”, *J. Neurophysiology*, V.78, pp. 3371-3385, 1998.

[41] Alaburda A., Alaburda M., Baginskas A., Gutman A., and Svirskis, G., “Criteria of bistability of the cylindrical dendrite with variable negative slope of N-shaped current-voltage (I-V) membrane characteristic” *Biophysics-USSR*, V.46, pp. 337-340, 2001.

[42] Brodin L., Traven H. G. C., and Lansner A., “Computer simulation of N-methyl-D -aspartate (NMDA) receptor-induced membrane properties in a neuron model” *J. Neurophysiol*, 66(2), pp. 473-484, 1991.

[43] Svirskis G., Svirskene N., and Gutman A., “The theoretical analysis of multistability of pyramidal neurons”, *Biofizika*, pp. 87-91, 1998.

[44] Bailey J., Wilson P. R., Brown A. D., and Chad J., “Behavioural Simulation of Biological Neuron Systems using VHDL and VHDL-AMS”, in *IEEE Behavioural Modeling and Simulation*, San Jose, USA. pp. 153-158, 2007.

[45] Bailey, J., Wilson, P. R., Brown, A. D. and Chad, J., “Behavioural Simulation and Synthesis of Biological Neuron Systems using VHDL”, in *IEEE Behavioural Modeling and Simulation*, Sep 2008, San Jose, USA. pp. 7-12, 2008.

[46] G. W. Gross, “The Use of Neuronal Networks of Multielectrode Array as Biosensors”, *Biosens. Bioelectron.*, V.10, pp. 553-567, 1995.

[47] E. T. Claverol, “An event-driven approach to biologically realistic simulation of neural aggregates”, *Doctor of Philosophy, Electronics & Computer Science Dept., University of Southampton, UK, Southampton*, 2000.

[48] E.T. Claverol, “Discrete simulation of large aggregates of neurons”, *Neurocomputing*, V. 47, pp. 277-297, 2002.

[49] E.T. Claverol, “A Large-Scale Simulation of the Piriform Cortex by a Cell Automaton-Based Network Model”, in *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, V.49, pp. 921-934, 2002.

[50] W. Rall, “Theoretical significance of dendritic trees for neuronal input-output relations”, *Stanford, CA: Stanford University Press.*, 1964.

[51] I. Segev, and R. E. Burke, “Compartmental Models of Complex Neurons”, in *Methods in Neuronal Modeling: From Ions to Networks, Second edition Cambridge, Massachusetts: MIT Press*, 1998.

[52] I. Segev, et al., “Modeling the electrical behavior of anatomically complex neurons using a network analysis”, 53(1), pp. 41-56, 1985.

[53] Peter Tino, “Artificial Neural Network Models”, *Springer handbook of computational intelligence*, V.8, I.3, pp. 456- 457, 1997.

[54] John D. Zakis and Brian J. Lithgow, “Neuron Modeling using VHDL”, 1999.

[55] Xilinx ISE. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурса: <https://www.xilinx.com/products/design-tools/ise-design-suite.html>.

[56] JIAPU Pan, and Wills J.Tompkins, “A real Time QRS Detection Algorithm” *IEEE Transactions on biomedical Engineering*, 32(3), 1985.

[57] W. Sandham, D. Hamilton, P. Laguna, and M. Cohen “Advances in Electrocardiogram Signal Processing and Analysis”, *Hindawi Publishing Corporation EURASIP Journal on Advances in Signal Processing Volume*, 2007.

[58] Ashish S., “Hardware Implementation of Real Time ECG Analysis Algorithm”. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://scholarspace.manoa.hawaii.edu/handle/10125/20576>.

[59] Chris F. Zhang and Tae-wuk, Bae “VLSI Friendly ECG QRS Complex Detector for Body Sensor Network”, V.2, No.1, 2012.

[60] F.Zhang and Y.Lin “Novel QRS Detection by CWT for ECG sensor”, in *IEEE Biomedcircuit system montrael, Canada*, 2012.

[61] S. Sumathi, and M.Y. Sanavullah, “Comparative Study of QRS Complex Detection in ECG” *International Journal of Recent Trends in Engineering*, V., No. 5, 2009.

[62] M. Millis “Advances in Electrocardiograms Clinical Applications”, 2012.

[63] Sameer K. Salih, S. A. Aljunid, Abid Yahya, and Khalid Ghailan “A Novel Approach for Detecting QRS Complex of ECG signal”, *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, V.9, I.6, No 3, 2012.

[64] J. Lazzaro, J. Wawrzynek, M. Mahowald, M. Sivilotti, and D. Gillespie, “Silicon auditory processors as computer peripherals,” in *IEEE Trans. Neural Netw.*, vol. 4, no. 3, pp. 523-528, 1993.

[65] Neha Joshi and Preet Jain “ECG Based Heart Rate Monitoring System Implementation Using FPGA For Low Power Devices And Applications” *International Journal of Research in Engineering and Technology*.

[66] Inan Güler and Elif Derya Übeyli, “ECG Beat Classifier Designed by Combined Neural Network Model”, *The Journal of Pattern Recognition Society*, 2004.

[67] Atena Sajedin, “A Trainable Neural Network Ensemble for ECG Beat Classification”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, No.69, 2010.

[68] GARMIN: офіційна сторінка [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://garmin.com.ua>.

[69] V. Varshavsky, V. Marakhovsky, and H. Saito, “CMOS Implementation of an Artificial Neuron Training on Logical Threshold Functions”, *WSEAS Transaction on Circuits and Systems*, No. 4, V. 8, p. 370-390, 2009.

[70] S. Barro, M. Fernandez-Delgado, J.A. Vila-Sobrino, C. V. Regueiro and E. Sanchez, “Classifying Multichannel ECG Patterns with an Adaptive Neural Network”, *IEEE engineering in medicine and biology*, 1998.

[71] M. Rossman, A. Buhlmeier, G. Manteuffe and K. Goser, “Short- and Long-Term Dynamics in a Stochastic Pulse Stream Neuron Implementation on

FPGA”, in *Artificial Neural Networks: 6th international conference; proceedings (ICANN 96)*, 1997.

[72] H. Gholam Hosseini, D. Luo and K.J. Reynolds, “The comparison of different feed forward neural network architectures for ECG signal diagnosis”, *Medical Engineering & Physics*, 2005.

[73] I. D. Castro, C. Varon, T. Torfs, S. Van Huffel, R. Puers, and C. Van Hoof, “Evaluation of a multichannel non-contact eeg system and signal quality algorithms for sleep apnea detection and monitoring,” *Sensors*, V.18, N. 2, p. 577, 2018.

[74] M. Nappi, V. Piuri, T. Tan, and D. Zhang, “Introduction to the special section on biometric systems and applications,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, V. 44, N. 11, pp. 1457-1460, 2014.

[75] K. A. Sidek, I. Khalil, and H. F. Jelinek, “Ecg biometric with abnormal cardiac conditions in remote monitoring system,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, V. 44, N. 11, pp. 1498-1509, 2014.

[76] S. Kiranyaz, T. Ince, and M. Gabbouj, “Real-time patient-specific eeg classification by 1-d convolutional neural networks”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, V. 63, N. 3, pp. 664-675, 2016.

[77] B. Pourbabae, M. J. Roshtkhari, and K. Khorasani, “Deep convolution neural networks and learning eeg features for screening paroxysmal atrial fibrillation patients”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017.

[78] A. Szczepanski and K. Saeed, “A mobile device system for early warning of eeg anomalies”, *Sensors*, V. 14, N. 6, pp. 11031-11044, 2014.

[79] Z. Zhao, L. Yang, D. Chen, and Y. Luo, “A human eeg identification system based on ensemble empirical mode decomposition”, *Sensors*, V. 13, N. 5, pp. 6832-6864, 2013.

[80] A. De Gaetano, S. Panunzi, F. Rinaldi, A. Risi, and M. Sciandrone, “A patient adaptable ECG beat classifier based on neural networks “, *Applied Mathematics and Computation*, pp. 243-249, 2009.

[81] Shanxiao Yang, and Guangying Yang, “ECG Pattern Recognition Based on Wavelet Transform and BP Neural Network”, *Proc. of the Sec. Inter. Symposium on Network Security*, 2010.

[82] B. Abibullaev, and H.D. Seo, “A New QRS Detection Method Using Wavelets and Artificial Neural Networks”, *Springer Science Business Media*, 2010.

[83] I. Guler, and E. D. Ubeyli, “Ecg beat classifier designed by combined neural network model”, *Pattern recognition*, V. 38, N. 2, pp. 199-208, 2005.

[84] S. Mitra, M. Mitra, and B. B. Chaudhuri, “A rough-set-based inference engine for ecg classification”, *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, V. 55, N. 6, pp. 2198-2206, 2006.

[85] T. Mar, S. Zaunseder, J. P. Mart´inez, M. Llamedo, and R. Poll, “Optimization of ecg classification by means of feature selection,” *IEEE transactions on Biomedical Engineering*, vol. 58, no. 8, pp. 2168-2177, 2011.

[86] W. Li, J. Li, and Q. Qin, “Set-based discriminative measure for electrocardiogram beat classification,” *Sensors*, vol. 17, no. 2, p. 234, 2017.

[87] Y. Wu, R. M. Rangayyan, Y. Zhou, and S.-C. Ng, “Filtering electrocardiographic signals using an unbiased and normalized adaptive noise reduction system”, *Medical Engineering & Physics*, vol. 31, no. 1, pp. 17-26, 2009.

[88] J. Yan, Y. Lu, J. Liu, X. Wu, and Y. Xu, “Self-adaptive model-based ecg denoising using features extracted by mean shift algorithm”, *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 5, no. 2, pp. 103-113, 2010.

[89] M. Blanco-Velasco, B. Weng, and K. E. Barner, “Ecg signal denoising and baseline wander correction based on the empirical mode decomposition”, *Computers in biology and medicine*, vol. 38, no. 1, pp. 1-13, 2008.

[90] V. Bhateja, S. Urooj, R. Mehrotra, R. Verma, A. Lay-Ekuakille, and V. D. Verma, “A composite wavelets and morphology approach for ecg noise filtering”, in *International Conference on Pattern Recognition and Machine Intelligence*. Springer, pp. 361-366, 2013

[91] W. Jenkal, R. Latif, A. Toumanari, A. Dliou, O. El Bcharri, and F. M. Maoulainine, “An efficient algorithm of ecg signal denoising using the adaptive dual

threshold filter and the discrete wavelet transform,” *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 36, no. 3, p. 499-508, 2016.

[92] S. Pongponsoi and X.-H. Yu, “An adaptive filtering approach for electrocardiogram (ecg) signal noise reduction using neural networks,” *Neurocomputing*, vol. 117, pp. 206-213, 2013.

[93] Y. Xu, M. Luo, T. Li, and G. Song, “Ecg signal de-noising and baseline wander correction based on ceemdan and wavelet threshold,” *Sensors*, vol. 17, no. 12, pp. 2754, 2017.

[94] V. X. Afonso, W. J. Tompkins, T. Q. Nguyen, and S. Luo, “Ecg beat detection using filter banks”, in *IEEE transactions on biomedical engineering*, vol. 46, no. 2, pp. 192-202, 1999.

[95] N. Zeng, Z. Wang, and H. Zhang, “Inferring nonlinear lateral flow immunoassay state-space models via an unscented kalman filter”, *Science China Information Sciences*, vol. 59, no. 11, pp. 112-204, 2016.

[96] M. Javadi, R. Ebrahimpour, A. Sajedin, S. Faridi, and S. Zakernejad, “Improving ecg classification accuracy using an ensemble of neural network modules”, *PLoS one*, vol. 6, no. 10, pp. 243-286, 2011.

[97] W. Liang, Y. Zhang, J. Tan, and Y. Li, “A novel approach to ecg classification based upon two-layered hmms in body sensor networks”, *Sensors*, vol. 14, no. 4, pp. 5994-6011, 2014.

[98] S. Osowski, L. T. Hoai, and T. Markiewicz, “Support vector machine based expert system for reliable heartbeat recognition,” *IEEE transactions on biomedical engineering*, vol. 51, no. 4, pp. 582-589, 2004.

[99] M. Barni, P. Failla, R. Lazzeretti, A.-R. Sadeghi, and T. Schneider, “Privacy-preserving ecg classification with branching programs and neural networks,” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 6, no. 2, pp. 452-468, 2011.

[100] J.-S. Wang, W.-C. Chiang, Y.-L. Hsu, and Y.-T. C. Yang, “Ecg arrhythmia classification using a probabilistic neural network with a feature reduction method”, *Neurocomputing*, vol. 116, pp. 38-45, 2013.

[101] Q. Li, C. Liu, J. Oster, and G. D. Clifford, “Signal processing and feature selection preprocessing for classification in noisy healthcare data”, *Machine Learning for Healthcare Technologies*, vol. 2, p. 33, 2016.