

АНОТАЦІЯ

Стрембіцька О.І. Методи та засоби оцінки пульсового сигналу при психоемоційному стресі у стоматологічній практиці. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 163 “Біомедична інженерія” в галузі знань 16 “Хімічна та біоінженерія”. - Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Тернопіль, 2021.

Підготовка здійснювалась на кафедрі біотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню актуального наукового завдання – вибір методів та засобів оцінювання пульсового сигналу при психоемоційному стресі у стоматологічній практиці на основі обґрунтованої математичної моделі пульсового сигналу, розробленню алгоритму та програмного забезпечення для технічних засобів аналізу пульсового сигналу з метою виявлення змін у роботі серцево-судинної системи при психоемоційному стресі у стоматологічній практиці. Об’єкт дослідження: процес відбору, моделювання та аналізу пульсового сигналу для виявлення інформативних ознак змін у роботі серцево-судинної системи людини під впливом стресу у стоматологічній практиці. Предмет дослідження: засоби відбору, математична модель, методи опрацювання та імітаційна модель пульсового сигналу при психоемоційному стресі у стоматологічній практиці для виявлення інформативних ознак змін у роботі серцево-судинної системи під впливом стресу.

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, наведено зв’язок роботи з науково-дослідною темою, поставлено мету та визначено завдання дослідження, об’єкт та предмет дослідження, наведено перелік методів дослідження, що застосовувались для досягнення мети дисертаційної роботи. Сформульовано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий

творчий внесок здобувача. Подано відомості щодо апробації та опублікування результатів дослідження.

У першому розділі проведено аналіз відомих методів відбору та аналізу пульсового сигналу, що застосовуються з діагностичною метою для виявлення відхилень у роботі серцево судинної-системи людини. За результатами аналізу показано, що проведення діагностування змін в організмі людини пов'язаних із психоемоційним стресом у стоматологічній практиці, потребує моделювання біофізичних процесів та методів їх аналізу із використанням математичного апарату опису цих процесів. Це є основою для оцінювання отриманих алгоритмів аналізу пульсового сигналу із використанням синтезованих на їх основі імітаційних моделей. Враховуючи механізм формування пульсової хвилі і особливості аналізу функціонального стану серцево-судинної системи за пульсовим сигналом, встановлено необхідність обґрунтування вибору адекватної математичної моделі на основі даних отриманих аналітичними методами.

У другому розділі проведено аналіз пульсового сигналу із використанням статистичних методів оцінки, а саме розраховано математичне сподівання, дисперсію та кореляційну функції. Розрахунок вказаних характеристик пульсового сигналу підтвердив, що адекватна модель пульсового сигналу повинна носити статистичний характер та задовольняти вимоги періодичності та випадковості. Встановлено, що такі вимоги враховує математична модель побудована методами енергетичної теорії стохастичних сигналів, а саме – у вигляді періодично корельованого випадкового процесу. Така модель має засоби, які враховують як пов'язаність гармонічних складових, так і зміни імовірнісних характеристик пульсового сигналу в часі. Моделювання пульсового сигналу засобами енергетичної теорії уможлиблює проведення його аналізу синфазним методом для створення в подальшому алгоритмів комп'ютерного опрацювання пульсового сигналу при психоемоційному стресі у стоматологічній практиці.

У третьому розділі на основі математичної моделі у вигляді періодично корельованого випадкового процесу розроблено алгоритм опрацювання пульсового сигналу для виділення та оцінки його характеристик. З метою

усунення завад з сигналів біологічного походження запропоновано використовувати попередню фільтрацію сигналу. Синтезовано цифровий режекторний фільтр для виділення шуму у певному спектрі частот. На базі обґрунтованої математичної моделі отримано вирази для обчислення характеристик сигналу синфазним методом та розроблено алгоритмічну базу для створення програмного забезпечення, призначеного для аналізу пульсового сигналу при психоемоційному стресі у стоматологічній практиці. При проведенні аналізу характеристик математичної моделі для синфазного опрацювання пульсового сигналу було встановлено, що вони розширюють можливості статистичної оцінки стану серцево-судинної системи людини. Такий результат досягається введенням додаткового класу інформативних ознак – кореляційних компонент, які відображають зміни фазо-часової структури пульсового сигналу.

У четвертому розділі наведено результати імітаційного моделювання пульсового сигналу при психоемоційному стресі для проведення валідації математичної моделі пульсового сигналу у вигляді періодично корельованого випадкового процесу. Імітаційна модель побудована у вигляді кусково-неперервної синусоїди, яка відображає характерні точки та форму пульсового сигналу і враховує у своїй структурі періодичність сигналів біологічного походження, випадкову складову, викликану як змінами у діяльності серцево-судинної системи, так і зовнішніми умовами, а також фази зміни роботи серцево-судинної системи при впливі стресу у стоматологічній практиці.

Встановлено, що запропонована імітаційна модель пульсового сигналу має високу точність відтворення параметрів пульсового сигналу. Розрахунок відносної похибки для розкиду амплітуди зімітованого та експериментально отриманого сигналів складає 3,97%. Відносна похибка між значенням періодів зімітованого та експериментально отриманого сигналів (по максимальній амплітуді) складає 3,41%. Розрахунок t -критерію Стьюдента для двох вибірок розкиду амплітуди та періоду для зімітованого та експериментально отриманого сигналів вказує, що різниця між даними є статистично не значущою – $p=0,296$ та $p=0,275$ відповідно.

Проведено верифікацію синфазного методу опрацювання пульсового сигналу при психоемоційному стресі на основі імітаційної моделі. Максимальне значення відносної похибки при опрацюванні сигналу синфазним методом складає 4%. Розрахунок t -критерію Стьюдента для $p \leq 0,01$ ($t_S = 0,5$, тобто значення знаходиться в зоні незначущості) свідчить про високу ймовірність порядку 0,95 визначення часу відновлення частоти серцевих скорочень після припинення дії стресу. Відповідно до розрахованого t -критерію Стьюдента ймовірність виконання гіпотези складає 95%. Це свідчить, що така модель дає високу точність при опрацюванні пульсового сигналу та уможлиблює оцінювання амплітудних та часових характеристик сигналу на основі кореляційних компонент як додаткових інформативних ознак для діагностики функціонального стану серцево-судинної системи при впливі стресу у стоматологічній практиці.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Застосовано періодично корельований випадковий процес як математичну модель пульсового сигналу при психоемоційному стресі, що уможливило врахування його періодичності, випадковості та кореляційних зв'язків, яка виражає динаміку процесу зміни функціонування серцево-судинної системи при впливі стресу у стоматологічній практиці.

2. Вперше розроблено метод та алгоритм визначення періоду пульсового сигналу на основі функції пошуку максимального значення сигналу в межах періоду та підтвердження знаходження пікового значення шляхом циклічного порівняння з середнім значенням для вибірки з ковзним фіксованим числом періодів, що уможливило підвищення точності визначення періоду пульсового сигналу при психоемоційному стресі у стоматологічній практиці.

3. Розроблено метод та алгоритм аналізу пульсового сигналу при психоемоційному стресі у стоматологічній практиці на основі синфазного методу, що дало можливість підвищити точність виявлення часових меж, які вказують на зміни у функціонуванні серцево-судинної системи під впливом стресу у стоматологічній практиці.

4. Розроблено метод та алгоритм комп'ютерного імітаційного моделювання пульсового сигналу при психоемоційному стресі на основі моделювання характерних точок та кривих пульсового сигналу і кривої зміни діяльності серцево-судинної системи при впливі стресу, що уможливило верифікацію методу опрацювання пульсового сигналу при психоемоційному стресі у стоматологічній практиці.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційного дослідження полягає у тому, що розроблено метод та обґрунтовані засоби відбору пульсового сигналу при психоемоційному стресі у стоматологічній практиці. Розроблено комп'ютерний алгоритм та програмне забезпечення для технічних систем опрацювання пульсового сигналу при психоемоційному стресі синфазним методом, що дало змогу визначити часові моменти, які свідчать про зміни у функціонуванні серцево-судинної системи. Розроблено та реалізовано імітаційну модель пульсового сигналу при психоемоційному стресі у стоматологічній практиці, завдяки якій результати моделювання використано для тестування алгоритмів опрацювання даних. Отримані наукові та практичні результати, методики й рекомендації впроваджено у процес розробки нових видів продукції конструкторського відділу ПП «Галіт» (с. Байківці, Тернопільського р-ну, Тернопільської обл.).

Основні результати досліджень, що відображені у дисертаційній роботі, опубліковано у 10 наукових працях: з них 1 стаття у науковому фаховому виданні України; 1 стаття у науковому періодичному виданні інших держав, яке індексується у міжнародній наукометричній базі Web of Science; 1 стаття у виданні України, яке індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus та 7 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських наукових та науково-технічних конференціях.

Ключові слова: пульсовий сигнал, психоемоційний стрес, стоматологія, періодично корельований випадковий процес, синфазний метод, імітаційна модель, алгоритм, програмне забезпечення, верифікація, валідація, відносна похибка, критерій Стюдента.

SUMMARY

Strembitska O.I. Methods and tools for assessing the pulse signal in psycho-emotional stress in dental practice. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 163 "Biomedical engineering" in the field of knowledge 16 "Chemical and bioengineering". - Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyuy. Ternopil, 2021.

The training was carried out at the Department of Biotechnical Systems of Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyuy of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

The dissertation is devoted to solving the current scientific problem - the choice of methods and means of assessing the pulse signal in psycho-emotional stress in dental practice on the basis of a sound mathematical model of the pulse signal, algorithm development and software for technical analysis of pulse signal to detect changes in heart rate vascular system in psycho-emotional stress in dental practice. Object of research: the process of selection, modeling and analysis of the pulse signal to identify informative signs of changes in the human cardiovascular system under the influence of stress in dental practice. Subject of research: means of selection, mathematical model, methods of processing and simulation model of pulse signal in psycho-emotional stress in dental practice to identify informative signs of changes in the cardiovascular system under the influence of stress.

The introduction substantiates the relevance of the study, links the work with the research topic, sets the purpose and objectives of the study, object and subject of research, lists the research methods used to achieve the goal of the dissertation. The scientific novelty, practical significance of the obtained results and personal creative contribution of the applicant are formulated. Information on approbation and publication of research results is given.

The first section analyzes the known methods of selection and analysis of the pulse signal, which are used for diagnostic purposes to detect abnormalities in the cardiovascular system. According to the results of the analysis, it is shown that diagnosing changes in the human body related to psycho-emotional stress in dental practice requires modeling of biophysical processes and methods of their analysis using a mathematical apparatus to describe these processes. This is the basis for evaluating the obtained algorithms for pulse signal analysis using simulated simulation models based on them. Given the mechanism of pulse wave formation and features of the analysis of the functional state of the cardiovascular system by the pulse signal, the need to justify the choice of an adequate mathematical model based on data obtained by analytical methods.

In the second section, the analysis of the pulse signal using statistical estimation methods is performed, namely, the mathematical expectation, variance and correlation function are calculated. The calculation of these characteristics of the pulse signal confirmed that an adequate model of the pulse signal must be statistical in nature and meet the requirements of periodicity and randomness. It is established that such requirements are taken into account by a mathematical model built by the methods of energy theory of stochastic signals, namely - in the form of a periodically correlated random process. This model has tools that take into account both the connection of harmonic components and changes in the probabilistic characteristics of the pulse signal over time. Modeling of the pulse signal by means of energy theory allows its analysis by the in-phase method to create further algorithms for computer processing of the pulse signal under psycho-emotional stress in dental practice.

In the third section, based on a mathematical model in the form of a periodically correlated random process, an algorithm for processing a pulse signal to select and evaluate its characteristics is developed. In order to eliminate interference from signals of biological origin, it is proposed to use pre-filtering of the signal. A digital notch filter has been synthesized to extract noise in a certain frequency range. On the basis of a substantiated mathematical model, expressions for calculating the characteristics of the signal by the in-phase method are obtained and an algorithmic basis for creating

software designed for the analysis of the pulse signal under psycho-emotional stress in dental practice is developed. When analyzing the characteristics of the mathematical model for in-phase processing of the pulse signal, it was found that they expand the possibilities of statistical assessment of the human cardiovascular system. This result is achieved by introducing an additional class of informative features - correlation components that reflect changes in the phase-time structure of the pulse signal.

The fourth section presents the results of simulation modeling of the pulse signal under psycho-emotional stress for validation of the mathematical model of the pulse signal in the form of a periodically correlated random process. The simulation model is built in the form of a piecewise continuous sinusoid, which reflects the characteristic points and shape of the pulse signal and takes into account in its structure the periodicity of signals of biological origin, random component caused by changes in cardiovascular system and external conditions. work of the cardiovascular system under the influence of stress in dental practice.

It is established that the proposed simulation model of the pulse signal has a high accuracy of reproduction of the pulse signal parameters. The calculation of the relative error for the scatter of the amplitude of the simulated and experimentally obtained signals is 3.97%. The relative error between the values of the periods of simulated and experimentally obtained signals (maximum amplitude) is 3.41%. The calculation of Student's t-test for two samples of amplitude and period scatter for simulated and experimentally obtained signals indicates that the difference between the data is statistically insignificant - $p = 0.296$ and $p = 0.275$, respectively.

Verification of the in-phase method of pulse signal processing under psycho-emotional stress on the basis of the simulation model is carried out. The maximum value of the relative error in signal processing by the in-phase method is 4%. The calculation of the Student's t-test for $p \leq 0.01$ ($t_S = 0.5$, ie the value is in the zone of insignificance) indicates a high probability of about 0.95 to determine the recovery time of heart rate after cessation of stress. According to the calculated Student's t-test, the probability of fulfilling the hypothesis is 95%. This indicates that such a model provides high accuracy in the processing of the pulse signal and allows the evaluation of

amplitude and time characteristics of the signal based on correlation components as additional informative features for diagnosing the functional state of the cardiovascular system under stress in dental practice.

Scientific novelty of the obtained results.

1. Periodically correlated random process as a mathematical model of pulse signal in psycho-emotional stress, which allowed to take into account its periodicity, randomness and correlations, which expresses the dynamics of changes in the functioning of the cardiovascular system under stress in dental practice.

2. For the first time a method and algorithm for determining the period of the pulse signal based on the function of finding the maximum value of the signal within the period and confirming the peak value by cyclic comparison with the average value for sampling with a fixed number of periods, which allowed to increase the accuracy of stress in dental practice.

3. A method and algorithm for analyzing the pulse signal in psychoemotional stress in dental practice based on the in-phase method, which allowed to increase the accuracy of time limits, which indicate changes in the functioning of the cardiovascular system under the influence of stress in dental practice.

4. The method and algorithm of computer simulation modeling of pulse signal at psychoemotional stress on the basis of modeling of characteristic points and curves of pulse signal and curve of change of activity of cardiovascular system at influence of stress that enabled verification of a method of processing of pulse signal at psychoemotional stress in dentistry .

The practical significance of the obtained results of the dissertation research is that the method and substantiated means of pulse signal selection in case of psycho-emotional stress in dental practice are developed. A computer algorithm and software for technical systems of pulse signal processing in psycho-emotional stress by the in-phase method have been developed, which allowed to determine the time moments that indicate changes in the functioning of the cardiovascular system. A simulation model of the pulse signal in psycho-emotional stress in dental practice has been developed and implemented, thanks to which the simulation results were used to test data processing

algorithms. The obtained scientific and practical results, methods and recommendations have been implemented in the process of developing new types of products of the design department of PC "Galit" (Baykivtsi village, Ternopil district, Ternopil region).

The main results of the research, which are reflected in the dissertation, are published in 10 scientific works: 1 article in the scientific professional publication of Ukraine; 1 article in a scientific periodical of other states, which is indexed in the international scientometric database Web of Science; 1 article in the publication of Ukraine, which is indexed in the international scientometric database Scopus and 7 abstracts of reports at international and national scientific and scientific-technical conferences.

Key words: pulse signal, psychoemotional stress, dentistry, periodically correlated random process, in - phase method, simulation model, algorithm, software, verification, validation, relative error, Student 's criterion.

Список публікацій здобувача

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Development of a simulation model of a photoplethysmographic signal under psychoemotional stress / E.Yavorska, O. Strembitska, M. Strembitskyi, I. Pankiv. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – №2 (9 (110)). – С. 36–45. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.227001>. (*індексується у Scopus, CrossRef, Index Copernicus Journals Master List, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Google Scholar*). - розроблено комп'ютерну імітаційну модель фотоплетизмографічного сигналу при психоемоційному стресі.

2. Technology Of Application Of Multifrequency Signals To Create An Electromagnetic Field / [O. Strembitska, R. Tymoshenko, M. Mozhaiev та ін.]. // *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. – 2021. – №2 (21). – С. 40–43. doi: <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2021.21.2.5>. (*індексується у Web of Science, Google Scholar*). - розглянуто просторово-фазо-частотні сигнали як такі, що містять періодичні та випадкові складові.

3. Evaluation of methods for determining abnormalities in cardiovascular system by pulse signal under psycho-emotional stress in dental practice / Y.Yavorska, O. Strembitska, M. Strembitskyi, L. Hvostivska. // *Scientific Journal of TNTU*. – 2020. – С. 118–126. doi: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.04.118. (*індексується у Index Copernicus, Google Scholar*). - проведено порівняльний аналіз методів опрацювання пульсового сигналу.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4. Яворська, Є. Б. Комп'ютерне імітаційне моделювання фотоплетизмографічного сигналу при зміні психоемоційного стану пацієнта у стоматологічній практиці [Текст] / Яворська Є. Б., Стрембіцька О. І. // Оптоелектронні інформаційні технології “*ФОТОНІКА-ОДС-2020*”. Збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції, м. Вінниця, 5-7 жовтня

2020 року. – Вінниця: “ТД Едельвейс і К”, 2020. – С.14. - розроблено комп’ютерну імітаційну модель фотоплетизмографічного сигналу при психоемоційному стресі.

5. Яворська, Є.Б. Алгоритм опрацювання фотоплетизмографічного сигналу синфазним методом для визначення змін психоемоційного стану пацієнта у стоматології [Текст] / Яворська Є.Б., Стрембіцька О.І. // II Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні системи та технології в медицині» (ІСМ–2019) [Текст] : збірник наукових праць – Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2019. – С.118-119. - запропоновано алгоритм опрацювання пульсового сигналу синфазним методом при психоемоційному стресі.

6. Яворська, Є.Б. Використання синфазного методу опрацювання фотоплетизмографічного сигналу для оцінки психоемоційного стану пацієнта у стоматологічній практиці [Текст] / Яворська Є., Стрембіцька О. // Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції, 20-21 червня 2019 року: збірник тез доповідей. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2019. – С. 155-158. - запропоновано алгоритм опрацювання пульсового сигналу синфазним методом при психоемоційному стресі.

7. Яворська, Є.Б. Модель пульсового сигналу для оцінювання психоемоційного стану пацієнта у стоматологічній практиці [Текст] / Яворська Є.Б., Стрембіцька О.І. // Сучасні досягнення в науці і освіті: збірник праць XIII Міжнародної наукової конференції, 6-13 вересня 2018р., м. Нетанья (Ізраїль). – Хмельницький, 2018. – С. 13-15. - запропоновано математичну модель пульсового сигналу при психоемоційному стресі.

8. Яворська, Є.Б. Вибір методів та засобів оцінювання пульсового сигналу при психоемоційному стресі у стоматологічній практиці [Текст] / О.І. Стрембіцька, Є.Б. Яворська // Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції до 100-річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам’яті Івана Пулюя (100-річчя з дня смерті), (Тернопіль, 23–24 травня 2018 року) / Науковий

секретар: Золотий Р.З. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – С. 241. - запропоновано алгоритм опрацювання пульсового сигналу при психоемоційному стресі синфазним методом.

9. Стрембіцька, О.І. Математична модель пульсового сигналу при фізичному навантаженні [Текст] / О.І. Стрембіцька, Т.І. Горин // Актуальні задачі сучасних технологій: збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів, (Тернопіль, 16-17 листопада 2017 року) – Тернопіль: ТНТУ, 2017. – С. 168. – запропоновано математичну модель пульсового сигналу при фізичному навантаженні.

10. Дунець, В. Л. Імітаційна модель фотоплетизмографічного сигналу при фізичному навантаженні [Текст] / В.Л. Дунець, О.І. Олійник. // Актуальні задачі сучасних технологій: збірник тез доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів, (Тернопіль, 17-18 листопада 2016 року) – Тернопіль: ТНТУ, 2016. – С. 89. - розроблено комп'ютерну імітаційну модель фотоплетизмографічного сигналу при фізичному навантаженні.