



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-4-66-72>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.021, 53.087.44, 612.172.4

АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ СЕРДЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА

А. Н. ОСИПОВ, О. Ч. РОЛИЧ, А. П. КЛЮЕВ, В. Д. ВЛАДЫМЦЕВ,
С. А. МИГАЛЕВИЧ, И. О. ХАЗАНОВСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 23.06.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Рассмотрены вопросы измерения частоты сердечных сокращений в системах мониторинга функционального состояния человека, работающих в реальном масштабе времени. Регистраторы систем данного класса чувствительны к помехам и шумам, вызванным двигательными артефактами, электромагнитными наводками от внешних источников, временной деградацией сенсоров и др. Приведено соотношение для расчета частоты сердечных сокращений и описан алгоритм вычисления, заключающийся в регистрации электрокардиограммы, вычислении спектрограммы электрокардиограммы и формировании из нее первого числового массива, вычислении второго преобразования Фурье числовых значений строк первого массива и пикового анализа вновь полученных амплитудных спектров. Реализация алгоритма позволяет получить более точную количественную оценку частоты сердечных сокращений в реальном масштабе времени в условиях наличия помех и шумов.

Ключевые слова: частота сердечных сокращений, спектрограмма, электрокардиограмма, реальный масштаб времени.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Статья подготовлена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках договора от 15.11.2021 № Ф21УЗБГ-001.

Для цитирования. Алгоритм измерения частоты сердечных сокращений в системах мониторинга функционального состояния человека / А. Н. Осипов [и др.] // Цифровая трансформация. 2023. Т. 29, № 4. С. 66–72. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-4-66-72>.

HEART RATE MEASUREMENT ALGORITHM IN THE MONITORING SYSTEM OF HUMAN BODY CONDITION

ANATOLY N. OSIPOV, OLEG CH. ROLICH, ANDREY P. KLUEV,
VADIM D. VLADYMTSEV, SERGEY A. MIGALEVICH, IGOR O. KHAZANOVSKY

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 23.06.2023

Abstract. The questions of measuring heart rate in systems for monitoring the functional state of a person operating in real time are considered. Recorders of systems of this class are sensitive to interference and noise caused by motor artifacts, electromagnetic interference from external sources, temporary degradation of sensors, etc. The ratio for the calculation of the heart rate is given and the calculation algorithm is described, which consists

in registering an electrocardiogram, calculating the electrocardiogram spectrogram and forming the first numerical array from it, calculating the second Fourier transform of the numerical values of the rows of the first array and peak analysis of the newly obtained amplitude spectra. The implementation of the algorithm makes it possible to obtain a more accurate quantitative assessment of the heart rate in real time in the presence of interference and noise.

Keywords: heart rate, spectrogram, electrocardiogram, real time scale.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The article was prepared with the support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research within the framework of agreement dated November 15, 2021 No F21UZBG-001.

For citation. Osipov A. N., Rolich O. Ch., Kluev A. P., Vladymtsev V. D., Migalevich S. A., Khazanovsky I. O. (2023) Heart Rate Measurement Algorithm in the Monitoring System of Human Body Condition. *Digital Transformation*. 29 (4), 66–72. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-4-66-72> (in Russian).

Введение

Взрывному росту цифровой медицины способствуют новые решения в области искусственного интеллекта, сенсорики, робототехники, беспроводной связи, обработки и анализа информации, дополненной и виртуальной реальности. Повышенный спрос отрасли на IT-решения также связан с увеличением доли больных с хроническими заболеваниями, потребностью обеспечить им постоянный мониторинг и длительный уход. Мощным драйвером развития цифровой медицины стала пандемия коронавируса.

Технологии искусственного интеллекта применяются во всех структурных элементах цифровой медицины: для повышения точности диагностирования и персонализации лечения на основе больших медицинских данных, накопленных в рамках электронного медицинского документооборота; для анализа медицинских изображений, полученных по телемедицинской системе, с помощью алгоритмов компьютерного зрения и т. д. Одними из перспективных приложений искусственного интеллекта являются определение функционального состояния человека, выявление предкризовых и кризисных состояний посредством систем носимой медицинской электроники, включающей системы непрерывного мониторинга состояния пациентов.

Разрабатываемые в настоящее время базовые (прототипы) системы дистанционного мониторинга ориентированы на контроль в режиме реального времени следующих основных физиологических показателей: сердцебиения, температуры тела и окружающей среды, насыщения тканей кислородом, положения тела [1–3]. Измерение частоты сердечных сокращений (ЧСС) по электрокардиограммам (ЭКГ) в масштабе реального времени на фоне умеренных синфазных помех, в основном наводимых в цепях питания, – задача сложная и актуальная. Для ее решения особый интерес представляют приборы оперативного мониторинга сердечного ритма на базе недорогих и широкодоступных портативных электрокардиографов и микроконтроллеров, исходно не предназначенных для высокоскоростной цифровой обработки сигналов [4, 5]. В портативных приборах реального времени при измерении ЧСС и иных показателей жизнедеятельности человека к помехам в цепях питания накладывается также динамика человека и его внутренних органов.

Алгоритм обработки электрокардиограммы

В статье решение задачи измерения ЧСС в масштабе реального времени на базе портативного электрокардиографа в составе прибора оперативного мониторинга сердечного ритма осуществлено посредством анализа спектрограммы электрокардиосигнала [6–8]. Данное решение обусловлено квазипериодичностью процесса сердцебиения и возможностью контроля поведения сигнала в отдельных частотных диапазонах, в особенности в диапазонах, наименее подверженных влиянию помех в цепях питания, а также выраженному характеру QRS-комплекса электрокардиограммы, который, как правило, явно выделяется на фоне шумов [9, 10].

Исследования показали, что в сердечном ритме электрокардиограммы наименее подвержен помехам спектральный участок примерно от $f_1 = 12$ Гц до $f_k = 45$ Гц. Соответственно, измерение ЧСС в предлагаемом алгоритме основывается на пиковом анализе амплитудных спектров числовых массивов, построенных на основе данных частотных срезов спектрограммы с номерами столбцов

(или строк – в зависимости от способа представления спектрограммы), соответствующих частотам из диапазона $[f_1, f_k]$. Предлагаемый алгоритм измерения ЧСС состоит из шести этапов.

1. Регистрация ЭКГ и вычисление скользящего оконного быстрого преобразования Фурье (БПФ) с использованием весовой функции Хэмминга и вычислением спектрограммы электрокардиограммы.

2. Формирование первого числового массива, столбцами которого являются вычисленные амплитудные спектры оконного преобразования Фурье, а строки – это частотные срезы спектрограммы на участке $[f_1, f_k]$.

3. Вычисление второго преобразования Фурье числовых значений строк первого числового массива и формирование второго числового массива.

4. Поиск координат глобальных максимумов в вычисленных амплитудных спектрах второго массива.

5. Расчет оценок ЧСС для каждого амплитудного спектра второго массива с учетом весов соседних глобальных максимумов гармоник и убывающего характера фрагмента амплитудного спектра.

6. Усреднение множества оценок ЧСС, вычисленных на предыдущем этапе.

Исходя из перечисленных этапов, алгоритм измерения ЧСС основывается на двукратном БПФ исходного электрокардиосигнала. Убывающий характер фрагмента амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) означает движение от ее максимума в обе стороны до первых подъемов. Для пояснения алгоритмических этапов на рис. 1, *a* (U – амплитуда кардиограммы; n – номера отсчетов, пропорциональные текущему времени электрокардиографического сигнала) представлен исходный электрокардиосигнал, регистрируемый портативным электрокардиографом с человека в естественных условиях, на рис. 1, *b* – его фрагмент с QRS-комплексом. При этом изоэлектрическая линия ЭКГ колеблется вместе с ее элементами. Это усложняет процесс детектирования и распознавания QRS-комплекса. Движения человека дополнительно заметно искажают сигнал, в некоторых местах практически полностью подавляя QRS-фрагмент. Период дискретизации сигнальных отсчетов $t_d = 2$ мс.

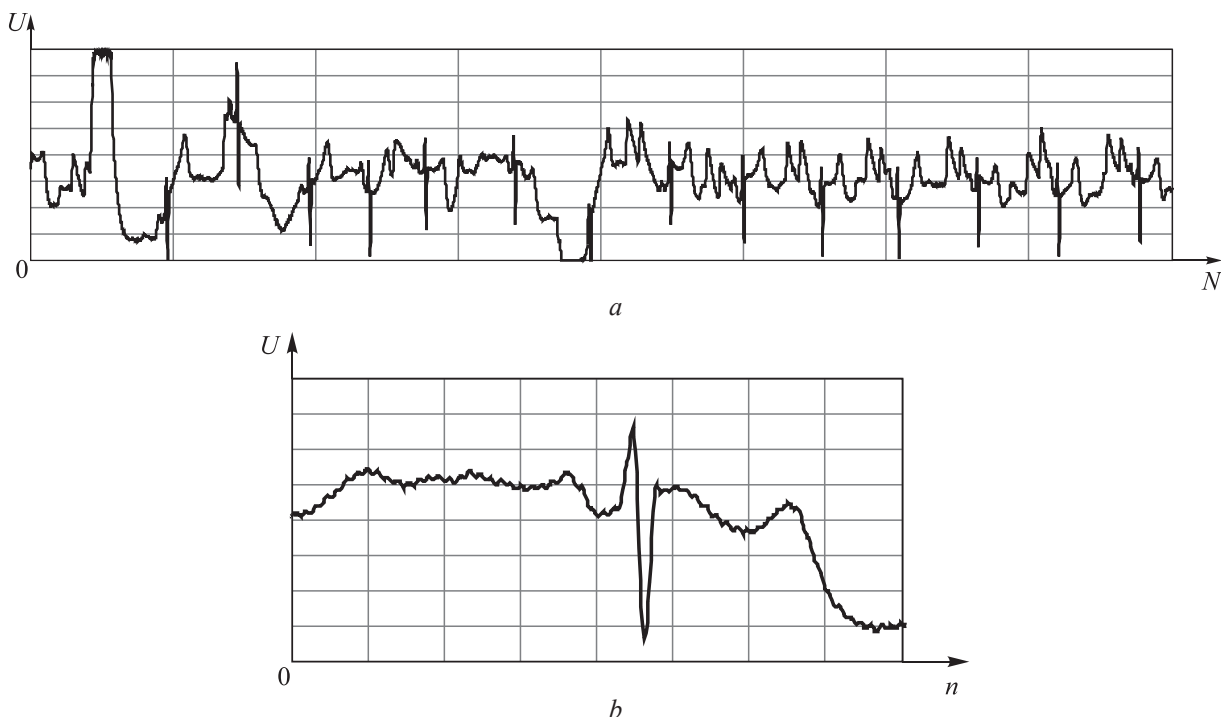


Рис. 1. Исходный кардиосигнал портативного электрокардиографа (*a*) и его фрагмент с QRS-комплексом (*b*)
Fig. 1. Initial cardiac signal from a portable electrocardiograph (*a*) and its fragment with the QRS complex (*b*)

Исследуемую последовательность кардиосигнала разбивали на m сигналов длиной n отсчетов. Количество отсчетов определяли исходя из условия, что их длительность не может быть меньше минимальной длительности QRS-комплекса и больше одного максимального периода между QRS-комплексами.

Скользящее оконное БПФ было выполнено с использованием весовой функции и вычислением спектрограммы (рис. 2). Благодаря квазипериодичности процессов жизнедеятельности и свойству периодичности Фурье-преобразования даже при сильном искажении QRS-комплекса его образ можно выделить в спектрограмме. Установлено, что наилучшее выделение QRS-образов обеспечивается в частотном диапазоне от $f_1 = 12$ Гц до $f_k = 45$ Гц.

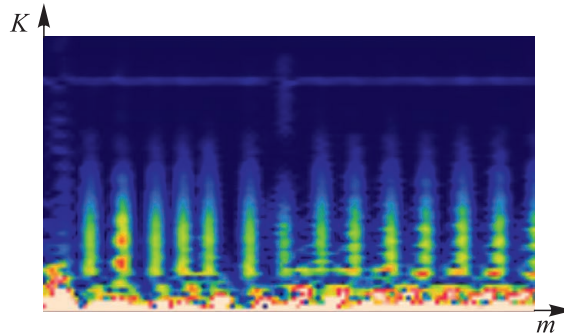


Рис. 2. Спектрограмма кардиограммы
Fig. 2. Spectrogram of cardiogram

На рис. 3 изображено изменение амплитуды 12-герцовой гармонической составляющей от времени (частотного среза) на исследуемом участке $[f_1, f_k]$, записанной в соответствующей j -й строке спектрограммы (A^* – амплитуда частотного среза).

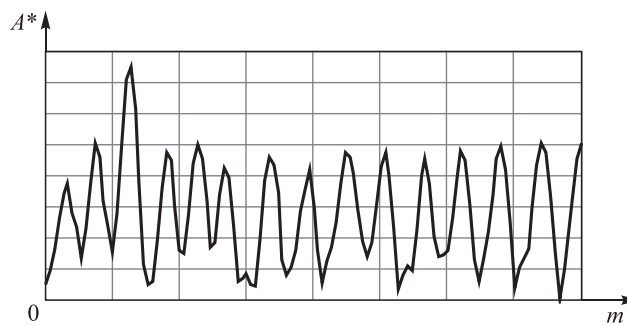


Рис. 3. Изменение амплитуды одной из гармонических составляющих
в диапазоне $[f_1, f_k]$ исходного кардиосигнала

Fig. 3. Changing the amplitude of one of the harmonic components in the range $[f_1, f_k]$ of the original cardiac signal

ЧСС оценивали путем повторного БПФ частотных срезов спектрограммы в диапазоне $[f_1, f_k]$. Формировали второй числовой массив, строками которого являлись амплитудные спектры, полученные в результате вычисления второго преобразования Фурье. На рис. 4 приведен один из амплитудных спектров (последовательность значений строк второго числового массива) (L – номер гармоники спектра, пропорциональный частоте).

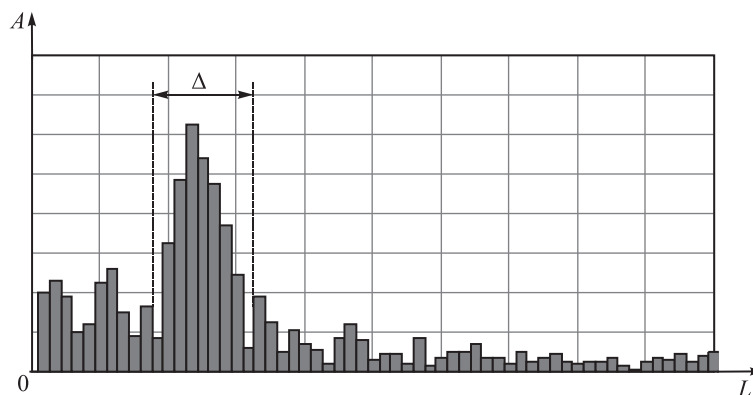


Рис. 4. Амплитудный спектр частотного среза
Fig. 4. Amplitude spectrum of the frequency section

В графике изменения амплитуды определенной гармонической составляющей исходного сигнала на рис. 3 очевиден квазипериодический, связанный с сердцебиением, процесс. Этот же процесс проявляется и в спектрограмме на рис. 2, его частота соответствует околориковой области АЧХ на рис. 4.

Для получения более точной оценки ЧСС в вычислениях учитывались гармоники, соседние к максимальной $A_{j\max}$, с учетом убывающего характера околорикового фрагмента амплитудного спектра до первых подъемов. Данный интервал обозначен шириной Δ на рис. 4. Вклад этих гармоник в ЧСС на Δ -интервале учитывался посредством весовых коэффициентов w_δ , пропорциональных амплитудам A_δ гармоник с номерами δ , входящих в Δ -интервал амплитудного спектра сигнала частотного среза спектрограммы, причем

$$\text{ЧСС}_f = \frac{60}{t_d n} \sum_{\delta \in \Delta} (w_\delta \delta),$$

где $f \in [f_1, f_k]$ – индекс частотного среза спектрограммы исходной ЭКГ; t_d – период дискретизации отсчетов ЭКГ; n – длина скользящего окна.

Формула (1) рассчитана на измерение ЧСС в ударах в минуту. С учетом весового вклада ЧСС_f окончательное значение ЧСС вычисляли путем усреднения ЧСС_f по всем частотным индексам f , входящим в диапазон $[f_1, f_k]$.

Заключение

1. Описан алгоритм вычисления частоты сердечных сокращений, заключающийся в регистрации электрокардиограммы, вычислении скользящего оконного быстрого преобразования Фурье с использованием весовой функции Хэмминга, в получении спектрограммы электрокардиограммы и формировании из нее первого числового массива.

2. Выполнено вычисление второго преобразования Фурье числовых значений строк первого массива. Осуществлен пиковый анализ вновь полученных амплитудных спектров, определены частоты, соответствующие максимальной амплитуде спектров частотных срезов.

3. Значение частоты сердечных сокращений вычисляли путем усреднения значений частот, полученных на этапе пикового анализа. Приведено соотношение для расчета частоты сердечных сокращений.

4. Предложенный алгоритм измерения частоты сердечных сокращений реализован в портативном электрокардиографе на базе микроконтроллера ESP32 с архитектурой Tensilica Xtensa LX6 и кардиомодуля RC039 на основе усилителя AD8232. Среднее время вычисления частоты сердечных сокращений составляет не более 5 мс для длины скользящего окна $n = 128$ при шаге его перемещения, равном длине окна, и размере матрицы спектрограммы $n/2 \times n/8$. Применение частотно-временного преобразования на основе оконного преобразования Фурье для обработки данного класса сигналов позволяет повысить точность измерения частоты сердечных сокращений при движении человека.

Список литературы

1. Islam, Md. M. Development of Smart Healthcare Monitoring System in IoT Environment / Md. M. Islam, A. Rahaman, Md. R. Islam // SN Computer Science. 2020. Vol. 185, No 1. P. 1–11. Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00195-y>.
2. Pradhan, B. IoT-Based Applications in Healthcare Devices / B. Pradhan, S. Bhattacharyya, K. Pal // Journal of Healthcare Engineering. 2021. Vol. 2021. P. 1–18. Mode of access: <https://downloads.hindawi.com/journals/jhe/2021/6632599.pdf>.
3. Real-Time Framework for Patient Monitoring Systems Based on a Wireless Body Area Network / N. Mahmoud [et al.] // International Journal of Computer Applications. 2020. Vol. 176, No 27. P. 12–21. Mode of access: <https://www.ijcaonline.org/archives/volume176/number27/mahmoud-2020-ijca-920274.pdf>.
4. Sowmya, K. V. An Efficient Health Monitoring System with Temperature and Heart Rate Sensors Using IoT / K. V. Sowmya, V. Teju // European Journal of Molecular & Clinical Medicine. 2021. Vol. 8, No 2. P. 793–802. Mode of access: https://ejmcm.com/article_7497_1eb61761da420cc16e28825b0ea9f268.pdf.

5. Ghosh, A. Energy-Efficient IoT-Health Monitoring System Using Approximate Computing / A. Ghosh, A. Raha, A. Mukherjee // *Internet of Things*. 2020. No 9. P. 1–16. Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100166>.
6. Архитектура системы дистанционного мониторинга состояния человека на основе технологии интернета вещей / А. Н. Осипов [и др.] // *Медэлектроника–2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 8–9 декабря 2022 г.* Минск: Белор. госуд. ун-т информ. и электр., 2022. С. 40–42. Режим доступа: https://www.bsuir.by/m/12_100229_1_168906.pdf.
7. Ролич, О. Ч. Алгоритмы обработки сигналов в интегрированной системе виброакустической и тепловой диагностики дизельной аппаратуры / О. Ч. Ролич, В. Е. Тарасенко, Д. А. Михаевич // *Агропанорама*. 2020. № 6. С. 38–41. Режим доступа: https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/12920/1/2020_6.9.algoritmi.pdf.
8. Спектрально-статистический анализ виброакустических сигналов элементов дизеля / О. Ч. Ролич [и др.] // *Агропанорама*. 2022. № 4. С. 24–28. Режим доступа: https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/16854/1/2022_4.5.spektralno-statisticheskij.pdf.
9. Федотов, А. А. Математическое моделирование и анализ погрешностей измерительных преобразователей биомедицинских сигналов / А. А. Федотов, С. А. Акулов. М.: Физматлит, 2013. 282 с. Режим доступа: <https://ssau.ru/files/resources/sotrudniki/fizmatlit.pdf>.
10. Кузнецов, А. А. Биофизика сердца. Электрокардиографическое холтеровское мониторирование для исследования variability сердечного ритма условно здоровых людей / А. А. Кузнецов. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2013. 84 с. Режим доступа: http://op.vlsu.ru/fileadmin/Programmy/Magistratura/12.04.04/Metod_doc/UP_BFSk2_BTS.pdf.

References

1. Islam Md. M., Rahaman A., Islam Md. R. (2020) Development of Smart Healthcare Monitoring System in IoT Environment. *SN Computer Science*. 185 (1), 1–11. Available: <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00195-y>.
2. Pradhan B., Bhattacharyya S., Pal K. (2021) IoT-Based Applications in Healthcare Devices. *Journal of Healthcare Engineering*. 2021, 1–18. Available: <https://downloads.hindawi.com/journals/jhe/2021/6632599.pdf>.
3. Mahmoud N., El-Sappagh S., Abdelrazek S. M., El-Bakry H. M. (2020) A Real-Time Framework for Patient Monitoring Systems Based on a Wireless Body Area Network. *International Journal of Computer Applications*. 176 (27), 12–21. Available: <https://www.ijcaonline.org/archives/volume176/number27/mahmoud-2020-ijca-920274.pdf>.
4. Sowmya K. V., Teju V. (2021) An Efficient Health Monitoring System with Temperature and Heart Rate Sensors Using IoT. *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*. 8 (2), 793–802. Available: https://ejmcm.com/article_7497_1eb61761da420cc16e28825b0ea9f268.pdf.
5. Ghosh A., Raha A., Mukherjee A. (2020) Energy-Efficient IoT-Health Monitoring System using Approximate Computing. *Internet of Things*. (9), 1–16. Available: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100166>.
6. Osipov A. N., Kluev A. P., Rolich O. Ch., Migalevich S. A., Vladymtsev V. D., Hazanov I. O., Patseev A. V., Patseev S. V. (2022) Architecture of Human Body Condition Remote Monitoring System Based on IoT. *Medelelectronics–2022. Medical Electronic Devices and New Medical Technologies: Scientific Articles Book XIII International Sci.-Tech. Conference, Minsk, 8–9 Dec. 2022*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 40–42. Available: https://www.bsuir.by/m/12_100229_1_168906.pdf (in Russian).
7. Rolich O. Ch., Tarasenko V. E., Mihaevich D. A. (2020) Algorithm of Signals Processing in Integrated Systems of Vibroacoustic and Thermal Diesel Engine Diagnostics. *Agropanoram*. (6), 38–41. Available: https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/12920/1/2020_6.9.algoritmi.pdf (in Russian).
8. Rolich O. Ch., Tarasenko V. E., Mihaevich D. A., Zheshko A. A. (2022) Spectral-Statistical Analysis of Diesel Elements Vibroacoustic Signals. *Agropanoram*. (4), 24–28. Available: https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/16854/1/2022_4.5.spektralno-statisticheskij.pdf (in Russian).
9. Fedotov A. A., Akulov S. A. (2013) *Mathematical Modeling and Analysis of Biomedical Signal Converters Measuring Errors*. Moscow, Physmatlit Publ. 282. Available: <https://ssau.ru/files/resources/sotrudniki/fizmatlit.pdf> (in Russian).
10. Kyznetsov A. A. (2013) *Biophysics of Heart. Electrocardiographic Holter Monitoring for Research of Heart Rate Variability of Conditionally Healthy People*. Vladimir, Vladimir State University Publ. 84. Available: http://op.vlsu.ru/fileadmin/Programmy/Magistratura/12.04.04/Metod_doc/UP_BFSk2_BTS.pdf (in Russian).

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Осипов А. Н., к. т. н., доцент, начальник Центра междисциплинарных исследований Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Ролич О. Ч., к. т. н., доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Клюев А. П., ст. преподаватель кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Владымцев В. Д., ассистент кафедры информатики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Мигалевич С. А., магистр т. н., начальник Центра информатизации и инновационных разработок Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Хазановский И. О., заместитель начальника научно-производственно-образовательного инновационного центра СВЧ технологий и их метрологического обеспечения НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-85-40
E-mail: osipov@bsuir.by
Осипов Анатолий Николаевич

Information about the authors

Osipov A. N., Cand. of Sci., Head of the Center for Interdisciplinary Research of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Rolich O. Ch., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information and Computer-Aided Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Kluev A. P., Senior Lecturer at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Vladymtsev V. D., Assistant at the Department of Computer Science of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Migalevich S. A., M. of Sci., Head of the Center for Informatization and Innovative Developments of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Khazanovsky I. O., Deputy Head of the Research and Production and Educational Innovative Center of Microwave Technologies and their Metrological Supply of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-85-40
E-mail: osipov@bsuir.by
Osipov Anatoly Nikolaevich