

ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДИ ОТ НЕЛИНЕЙНАТА ДИНАМИКА ЗА АНАЛИЗ НА ВАРИАБИЛНОСТТА НА СЪРДЕЧНАТА ЧЕСТОТА

APPLICATION OF METHODS FROM NONLINEAR DYNAMICS FOR HEART RATE VARIABILITY ANALYSIS

Evgeniya Gospodinova

Institute of Robotics

Bulgarian Academy of Sciences

jenigospodinova@abv.bg

Abstract

The article presents the results of the study of the nonlinear properties of the dynamics of the intervals between heartbeats obtained from digital ECG signals of healthy subjects, patients with arrhythmia and patients with heart failure. Data analysis was performed by applying the following two methods of nonlinear dynamics: Recurrence plot and Poincaré plot, comparing with the linear histogram method. The visual evaluation of the repeating diagrams constructed by the Recurrence plot allows obtaining quick information about the behaviour of the studied process. The reduction of the complexity of the process (heart rhythm) and the transition to periodicity is indicative of a pathological change in the regulation of heart rhythm. Poincaré plot is a useful tool when rare and sudden disorders occur against the background of a monotonous heart rate. Cardiovascular diseases significantly affect the dynamics of heart rate, reducing variability.

Keywords: HRV, RR interval series, Recurrence plot, Poincaré plot.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Научните изследвания, проведени през последните години в областта на моделирането, обработката и анализа на цифрови физиологични данни (електрокардиограми (ECG), енцефалограми (ЕЕС), фотоплетизмограми (PPG) и др.), показват, че тези биологични сигнали включват детерминирани, стохастични и хаотични компоненти [1-3, 18, 22]. Първият и вторият компонент могат да бъдат разпознати чрез прилагането на традиционните методи за линеен анализ (Time- and Frequency-Domain analysis) [19-21], докато анализът на хаотичните свойства предизвиква определени трудности, свързани с необходимостта от използване на методи от нелинейната динамика. Хаотичното поведение се проявява в променливостта на сърдечната честота, която се определя от диагностичния параметър, наречен вариабилност на сърдечната честота (ВСЧ). ВСЧ отчита разликата между последователните удари на сърцето (RR времеви интервали) и тя е свързана с необходимостта от адаптиране на организма към променящите се условия на външната и вътрешната среда и отразява работата на целия организъм, а не само на сърдечно-съдовата система [7]. Намалването на променливостта, придружено от ясно определена периодичност на изследваните данни е проява на патологични промени в човешкия организъм [10, 13, 17, 24]. Своевременното

измерване на параметрите на хаотичното поведение на процесите могат значително да улеснят задачата за диагностициране на състоянието на субекта и да се намали вероятността от настъпване на сериозно заболяване.

Сред разнообразието от биологични сигнали, през последните години голям интерес от страна на информационните специалисти предизвиква изследването на цифрови ECG и PPG сигнали, които носят значима информация за процесите протичащи в сърдечно-съдовата система. Както е известно, тези два типа сигнали днес се разглеждат като нелинейни и нестационарни процеси. В края на 20 век, въз основа на идеите на нобеловия лауреат Илия Пригожин, авторите на публикация [23] предлагат сърцето да се разглежда като отворена, нелинейна и неравновесна система. Те определят като първа важна задача, която стои пред учените и лекарите, обединяването на техните усилия и знания в търсене на нови начини за решаване на редица клинични проблеми, като по този начин да се помогне на голям брой пациенти със сърдечно-съдови заболявания. Съществуващите нелинейности в системите за регулиране на сърцето определят хаотичната природа на сърдечния ритъм, като всеки RR (PP) интервал отчита интервала между два съседни сърдечни удара. Всеки интервал се отличава от останалите и те се характеризират със своята уникалност и неповторимост. Причината за появата на хаотичност в електрокардиограмите (фотоплетизмограмите) е свързана с хаотичността на процесите, протичащи в сърцето. В общият случай ECG (PPG) сигналите са случайни и нестационарни, които имат периодични и хаотични компоненти. Ето защо за оценка на информационните характеристики на вътрешната организация на тези сигнали е целесъобразно да се използват методите на нелинейната динамика.

Редица автори смятат, че информацията, закодирана във вариабилността на RR (PP) интервалните серии, не може да бъде напълно оценена, като се използва само един метод за анализ. Наличието на специфични интервални серии определя необходимостта от използване на различни методи за тяхната оценка. Поради тази причина за оценка на информационните характеристики на вътрешната организация на RR (PP) интервалните серии е целесъобразно да се използват освен линейни методи, които са стандартизирани [8] и методи на нелинейната динамика.

Целта на настоящата статия е изследване на нелинейните свойства на динамиката на интервалите между сърдечните удари, получени от цифрови ЕКГ сигнали на здрави субекти, пациенти с аритмия и пациенти със сърдечна недостатъчност. Анализът на данните ще бъде извършен чрез прилагане на следните два метода от нелинейната динамика: рекурентен метод (Recurrence plot) и метод на Поанкаре (Poincaré plot) и ще бъде направено сравнение с линейния хистограмен метод.

2. МЕТОДИ

2.1. Рекурентен метод

Рекурентният метод [9, 17] позволява визуално да се анализира изследвания нелинеен процес, според неговото графично изображение. Той се явява мощен инструмент за изследване на нелинейните свойства и откриване на скрити зависимости в наблюдаваните времеви редове. В основата на метода лежи построяването и анализа на рекурентна диаграма. Рекурентната диаграма се явява графично представяне на матрицата [16]:

$$R_{ij}(\varepsilon_i, m) = \theta(\varepsilon_i - \|X_i(m) - X_j(m)\|). \quad (1)$$

Където:

- $X_i(m)$ е фазовата траектория на динамичната система в m -мерното фазово пространство;
- $\theta(\cdot)$ is the Heaviside function;
- $\|X_i(m) - X_j(m)\|$ - разстояние между точките;
- ε определя близостта на съседните точки i .

Рекурентната матрица, построена във вид на графика, представлява двумерно множество от точки, в съответствие с уравнение (1). Матрицата се състои от нули и единици, като близките (рекурентни) точки се изобразяват с черен цвят, а далечните точки с бял цвят при черно-бяла графика. Близостта на съседните точки се определя от параметъра ε_i .

Анализът на топологията на диаграмата позволява да се класифицират наблюдаваните процеси, като [9]:

- Определяне на хомогенни процеси с независими случайни стойности;
- Определяне на процеси с бавно променящи се параметри;
- Определяне на периодични или осцилиращи процеси, съответстващи на нелинейни системи и др.

2.2. Метод на Поанкаре

Методът на Поанкаре е относително нова техника за анализиране на нелинейната динамика на ВСЧ. Той е геометричен модел, при който всеки от RR интервалите се представя като функция на предходния интервал и се нанася в координатната система [4-6]. Всяка двойка RR интервали (предишен и следващ) е с координати (x, y) , където x е стойността на RR_n интервала, а y е стойността на RR_{n+1} . При формирането на графиката се получава „облак“ от точки, чийто център е разположен на линията на идентичност. Линията на идентичност представлява графика на функцията $x=y$ ($PP_n=PP_{n+1}$). Ако точката е разположена над линията на идентичност, това означава, че $x < y$ ($PP_n < PP_{n+1}$). Съответно, ако точката е разположена под линията на идентичност, това свидетелства, че интервала PP_{n+1} е по-къс от PP_n интервала. Следователно, формата на „облака“ от точки ($PP_n; PP_{n+1}$) на графиката на Поанкаре отразява изменението на продължителността на PP интервалите, т.е дисперсията.

Ако върху графиката, построена чрез Поанкаре метода, се постави елипса с надлъжна и напречна ос, могат да се изведат следните показатели:

- Дължина на елипсата ($SD2$ [ms] параметър) – този показател съответства на дългосрочната вариабилност на RR интервалите и отразява общата ВСЧ;
- Ширина на елипсата ($SD1$ [ms] параметър) – този показател представя разсейването на точките по правата перпендикулярна на линията на идентичност и е свързана с бързите вариации между отделните сърдечни удари.

Основните характеристики, които се използват за визуалния анализ на ВСЧ чрез метода на Поанкаре са: формата, размера и разположението на главния „облак“ от точки, локализация и симетричност на точките в „облака“.

- Формата на „облака“ е категоризирана за различните функционални състояния на човека [11,12,14]:
 - Графиката на здравия субект има един главен „облак“ от точки до който могат да са равномерно разпръснати още точки. Главният „облак“ има формата на комета с тясна долна част и постепенно разширяваща се към върха.
 - Графиката на болния субект има формата на торпедо, ветрило или сложна форма (състояща се от няколко „облака“) в зависимост от вида на заболяването.
- Локализация и симетричност на точките в „облака“. Ако в графиката има повече от един клъстер, които по същество са отделни от главния „облак“, може да се очаква появата на аритмия. Като правило, тези клъстери показват наличието на екстрасистоли [15]. Симетрията на точките в „облака“ се определя спрямо линията на идентичност. Симетрията показва липсата на ритъмни смущения, а асиметрията обратно - наличието на такива.
- Разположение на главния „облак“. По позицията на главния „облак“ в графиката може да се предположи кой отдел на автономната нервна система (АНС) оказва по-голямо влияние върху ВСЧ.
 - Разположението на главния „облак“ в долния ляв ъгъл на графиката показва преобладаване на симпатиковия отдел;
 - Местоположението на главния „облак“ в горния десен ъгъл показва преобладаването на парасимпатиковия отдел.

2.3. Хистограмен метод

Хистограмният метод позволява образно представяне на разпределението на RR интервалните серии, като е необходимо регистрираните ECG сигнали да бъдат с продължителност не по-малка от 20 минути, следователно, краткосрочните записи не могат да бъдат оценени с помощта на този метод. Чрез построяването на хистограмата на RR интервалите се определя връзката между общия брой на идентифицираните RR интервали и тяхното изменение.

3. РЕЗУЛТАТИ

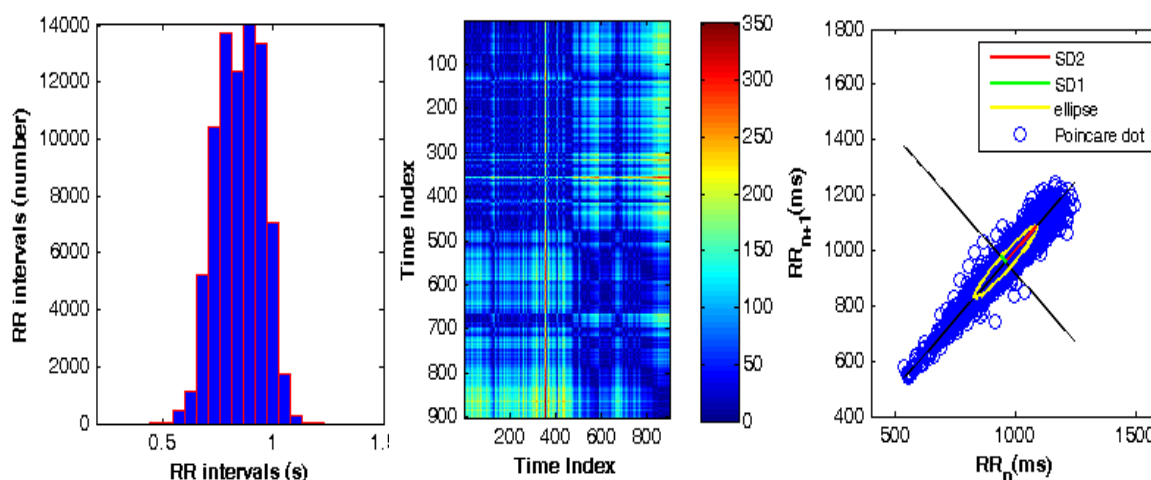
Графиките, разположени най-вляво на фиг. 1, фиг. 2 и фиг. 3 се отнасят за хистограмите на здрав субект, на пациент с аритмия и на пациент със сърдечна недостатъчност. От графиките ясно се вижда, че съществува разлика във формата на хистограмите при пациентите със сърдечно-съдови заболявания и здравия субект. За здравите контроли е характерно централно разположение на стълбовете в диаграмата на RR интервалите с локализация на най-високите стълбове (мода) в диапазона 0.7- 1.0 сек. Нормалната сърдечна дейност се характеризира със симетрична, куполообразна и плътна хистограма, като формата е близка по вид на кривата на Гаус. Асиметричната форма на хистограмата показва аритмичния характер на ЕКГ. Пример за такава хистограма е показана на фиг. 2, а на фиг. 3 е показана хистограмата на пациент със сърдечна недостатъчност. Тази хистограма имат ексцесивна форма с много тясна основа и заострен връх.

Графиките, разположени в средата на фиг.1, фиг.2 и фиг.3 се отнасят за графиките, получени чрез рекурентния метод на здрав субект, на пациент с аритмия и на пациент със сърдечна недостатъчност. Тези графики са получени през първите 10 минути

на 24-часов холтерен запис. За здрав субект графиката има диагонална линия и по-малко квадратчета, показващи по-висок ВСЧ. Аномалия като аритмия показва повече квадрати в графиката (фиг.2), показваща периодичността на изследвания сигнал, като в този случай ВСЧ намалява. При пациента със сърдечна недостатъчност, графиката се състои от квадрати, които са оцветени в синята гама. Причината за това поведение се дължи на факта, че при тези пациенти ВСЧ е ниска, защото RR интервалите са с приблизително еднаква дължина, което е видно от вида на хистограмата, показана на фиг.3.

Визуалната оценка на повтарящите се диаграми, построени чрез рекурентния метод, позволява получаването на бърза информация за поведението на изследвания процес. Намаляването на сложността на процеса (сърдечен ритъм) и преминаването към периодичност е показателно за патологична промяна в регулацията на сърдечния ритъм. Сърдечно-съдовите заболявания значително влияят на динамиката на RR интервалите, като ВСЧ е намалена.

На базата на стойностите на RR интервалите на изследваните 24-часови холтерни ЕКГ записи на фиг.1, фиг.2 и фиг.3 (дясно) са показани графиките, построени чрез метода на Поанкаре за здрав субект, пациент с аритмия и пациент със сърдечна недостатъчност. Графиката на здравия субект (фиг.1-дясно) има формата на комета с изострена долна част и постепенно разширяваща се към върха. Графиката (фиг.2-дясно) е на пациент с аритмия и тя има формата на ветрило, а на пациента със сърдечна недостатъчност (фиг.3-дясно) е силно компресирана, поради приблизително еднаквата дължина на RR интервалите.

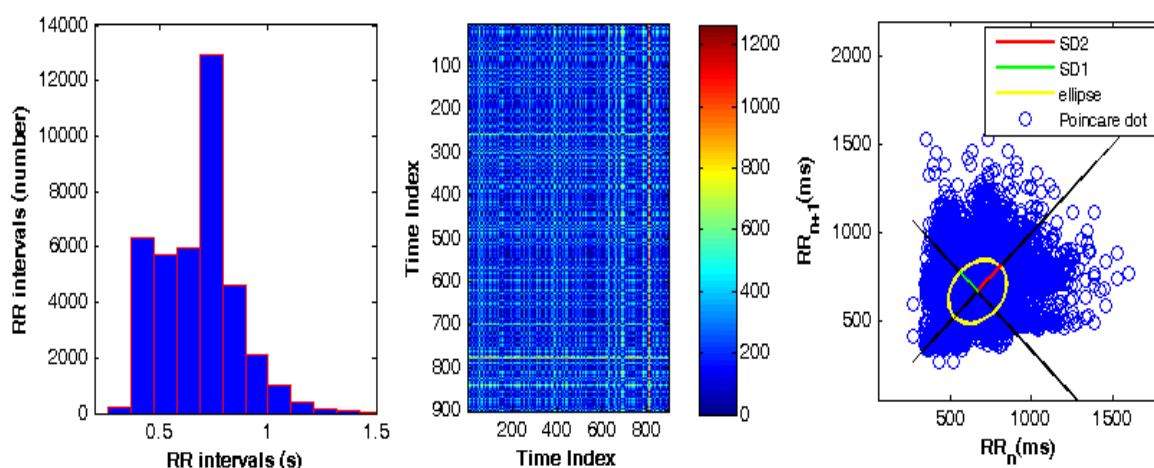


Фигура. 1. Хистограма, рекурентен метод и метод на Поанкаре за здрав субект

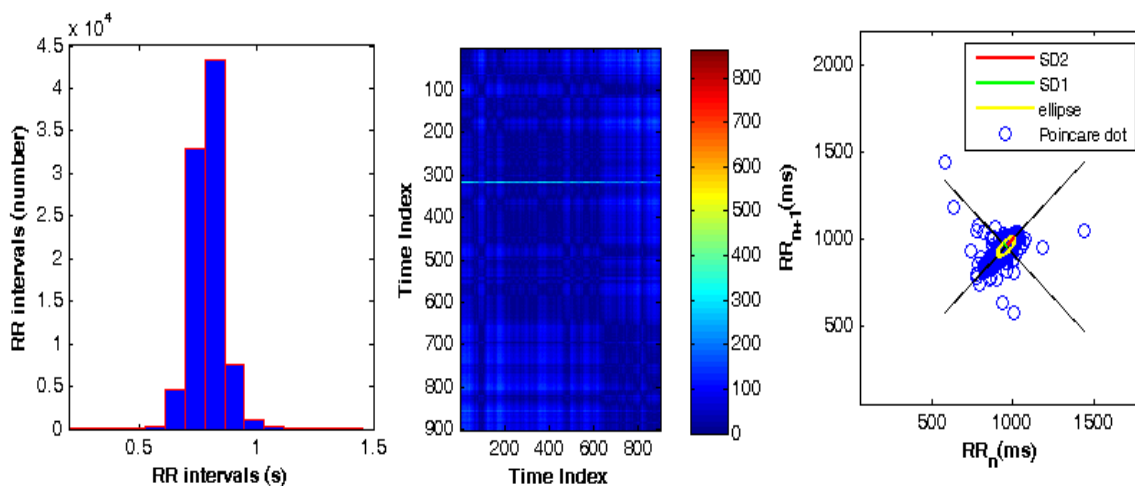
Чрез метода на Поанкаре за всяка диаграма се построява елипса с надлъжна и напречна ос. При здравите пациенти формата на елипсата е ясно изразена, докато при пациенти със заболявания-дължината и ширината на елипсата са приблизително равни и елипсата се доближава до кръг. Нормалната форма на скатерограмата е елипса, удължена по бисектрисата, което означава, че към дихателната е добавено определено количество недихателна аритмия. Формата на скатерограмата под формата на кръг означава отсъствие на недихателни компоненти на аритмия. Тесният овал, съответства на

преобладаването на недихателните компоненти в общата променливост на ритъма, която се определя от дължината на "облака" (скатерограмата).

Нелинейният метод на Поанкаре се явява полезен инструмент, когато на фона на монотонния ритъм на сърдечната честота се появяват редки и внезапни нарушения, като „ектопични“ съкращения. Този метод е подходящ при изследване на някои сърдечно-съдови заболявания, като например: аритмии, където методите на статистическия и спектрален анализ на ВСЧ са малоинформативни и в тези случаи е целесъобразно да се използва оценката на метода на Поанкаре.



Фигура. 2. Хистограма, рекурентен метод и метод на Поанкаре за болен с аритмия



Фигура. 3. Хистограма, рекурентен метод и метод на Поанкаре за болен със сърдечна недостатъчност

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методите на нелинейната динамика все по-често се използват в процеса за анализ на информация на ЕКГ сигнали поради факта, че те дават възможност за наблюдение на динамиката на сърдечната честота. Тези методи допълват традиционния анализ,

извършен чрез прилагане на линейните методи (методи във времевата и честотната области). Получените резултати от изследването на нелинейните динамични характеристики на времевите интервали между сърдечните интервали на изследваните три вида пациенти чрез прилагането на методи от нелинейната динамика показват, че те са подходящи за разграничаването на здрави от болни индивиди. Следователно прилагането на тези методи може да бъде полезно при диагностицирането на сърдечно-съдови заболявания.

Визуалният анализ на ВСЧ, базиран на метода на Поанкаре и рекурентния метод, предоставя важна информация за физиологичното състояние на пациентите. Методът на Поанкаре дава възможност на лекарите да видят целия 24-часов ЕКГ запис с един поглед и бързо да открият сърдечно-съдовите нарушения, ако има такива. Рекурентният метод се явява мощен инструмент за изследване на нелинейните свойства и откриване на скрити зависимости в наблюдаваните времеви редове. Резултатите от направените изследвания чрез рекурентния метод свидетелстват за това, че понижението на сложността на ритъма на сърцето, видно от получените диаграми при пациентите с аритмия и сърдечна недостатъчност са в резултат на патологично изменение в регулацията на сърдечния ритъм. Анализът на ВСЧ чрез тези два метода предоставя широки възможности за клинични и изследователски приложения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научното изследване е проведено като част от проекта „Изследване на приложението на нови математически методи за анализ на кардиологични данни“ № КП-06-Н22/5 от 07.12.2018 г., финансиран от Фонд „Научни Изследвания“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Acharya, U.R., Joseph, K.P., Kannathal, N., Lim, M., Suri, J.S. 2006. Heart rate variability: a review. *Med Bio Eng Comput*, 44, 1031-1051, <https://doi.org/10.1007/s11517-006-0119-0>
- [2] Acharya, U.R., Suri, J.S., Spaan, J.A.E., Krishnan, S.M. (Eds.). 2007. *Advances in Cardiac Signal Processing*. Berlin: Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-36675-1>
- [3] Ernst, G. 2014. *Heart Rate Variability*. London Springer-Verlag, <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4309-3>
- [4] Golińska, A. K. 2013. Poincaré Plot in Analysis of Selected Biomedical Signals. *Studies in Logic, Grammar and Rhetoric*, 35(48), 117-127, <https://doi.org/10.2478/slgr-2013-0031>
- [5] Kamen, P.W., Krum, H., Tonkin, A.M. 1996. Poincaré Plot for Heart Rate Variability Allows Quantitative Display of Parasympathetic Nervous Activity in Humans. *Clinical Science*, 91(2), 201-208, <https://doi.org/10.1042/cs0910201>
- [6] Khandoker, A.H., Karmakar, C., Brennan, M., Palaniswami, M., Voss, A. 2013. Poincaré Plot Methods for Heart Rate Variability Analysis. New York Heidelberg Dordrecht London: Springer, <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7375-6>
- [7] Kumar, D.M., Prasannakumar, S.C., Sudarshan, B.G., Jayadevappa, D. 2013, June. Heart Rate Variability Analysis: A Review. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 1(6), 9-24.
- [8] Malik, M. 1996. Heart rate variability: Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use: Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, 1(2).
- [9] Marwan, N., Romano, M.G., Thiel, M., Kurths, J. 2007. Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports*, 438(5-6), 237-329, <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.11.001>

- [10] Mirza, M., Lakshmi, A.N.R. 2012. A comparative study of Heart Rate Variability in diabetic subjects and normal subjects. *International Journal of Biomedical and Advance Research*, 3(08), 640-644, <https://doi.org/10.7439/ijbar.v3i8.542>
- [11] Piskorski, J., Guzik, P. 2005. Filtering Poincaré Plots. *Computational Methods in Science and Technology*, 11(1), 39-48, <https://doi.org/10.12921/cmst.2005.11.01.39-48>
- [12] Piskorski, J., Guzik, P. 2007. Geometry of the Poincaré Plot of RR intervals and its asymmetry in healthy adults. *Physiological Measurement*, 28(3), 287-300, <https://doi.org/10.1088/0967-3334/28/3/005>
- [13] Pfeifer, M.A., Cook, D., Brodsky, J., Tice, D., Reenan, A., Swedine, S., Halter, J.B., Porte, D. Jr. 1982. Quantitative evaluation of cardiac parasympathetic activity in normal and diabetic man. *Diabetes*, 31, 339-345, <https://doi.org/10.2337/diab.31.4.339>
- [14] Smith, R.L., Wathen, E. R., Abaci, P. C., Bergen, N. H. V., Law, I. H., Dick II, M. D., Connor, C., Dove, E. L. 2009. Analyzing Heart Rate Variability in Infants Using Non-Linear Poincaré Techniques. *Computer in Cardiology*, 36, 673-876.
- [15] Tayel, M.B., AlSaba, E. I. 2015. Poincaré Plot for Heart Rate Variability. *International Journal of Biomedical and Biological Engineering*, 9(9), 708-711.
- [16] Thiel, M., Romano, M.G, Kurths, J. 2004. How much information is contained in a recurrence plot? *Physics Letters A*, 330(5), 343-349, <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2004.07.050>
- [17] Turianikova, Z., Tonhajzerova, I., Czipelova, B., Javova, K., Lazarova, Z., Javorka, K. 2014. Recurrence Quantification Analysis of Heart Rate and Blood Pressure Variability in Obese Children and Adolescents. *Computing in Cardiology*, 41, 445-448.
- [18] Popovska E., Gospodinov M. 2019. Computation of Time Series Scaling Exponent for Electricity Prices Forecasting. In *processing of CompSysTech '19 Proceedings of the 20th International Conference on Computer Systems and Technologies*, ACM New York, NY, USA, ISBN:978-1-4503-7149-0, DOI:<https://doi.org/10.1145/3345252.3345267>, 194-199. SJR (Scopus): 0.169, <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3345252.3345267>
- [19] Todorov T., Bogdanova G., Noev N., Sabev N. 2019. Data management in a Holter Monitoring System, *TEM Journal*, 8(3), 801-805.
- [20] Georgieva-Tsaneva G., Gospodinov M., Bogdanova G. 2019. Online Platform for Processing and Storage of Information in the Field of Medicine: Improving Education of the Medical Students. In *Proceedings of 11th International Conference on Education and New Learning Technologies*, Palma, Spain, 01-03.07.2019, IATED, ISBN:978-84-09-12031-4, ISSN:2340-1117, DOI:10.21125/edulearn.2019.1223,48994906 <https://library.iated.org/view/GEORGIEVATSANEVA2019ONL>
- [21] Georgieva-Tsaneva, G. 2019. Frequency Analysis of Cardiac Data Obtained through Holter Monitoring in Real Living Conditions. In *Proceedings of CBU International Conference Proceedings*, 7, DOI:10.12955/cbup.v7.1498, 870-874 <https://ojs.journals.cz/index.php/CBUIC/article/view/1498>
- [22] Gospodinov M., Cheshmedzhiev K. 2019. Three-Sensor Portable Information System for Physiological Data Registration. In *Proceedings of CompSysTech '19 Proceedings of the 20th International Conference on Computer Systems and Technologies*, ACM New York, NY, USA, ISBN:978-1-4503-7149-0, DOI:<https://doi.org/10.1145/3345252.3345281>, 36-41. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3345252.3345281>
- [23] Schaldach, M. 1999. Physics of heart and circulation. *Prog. Biomed. Res.* 4, 475-480. Available online:<http://www.msbt.nat.fau.de/PBMR/documents/199904050475.pdf> (accessed on 20 December 2019).
- [24] Piperkov P., Todorova G., 2019. Methodology for investigation of the influence of religious activity on the physiological indicators of heart activity. In: *Proceedings of the I Scientific conference "Inovative STEM Education" (STEMEDU-2019)*, Veliko Tarnovo, Institute of mathematics and informatics - BAS. 1, 28-34. ISSN: 2683-1333 (in Bulgarian). <http://www.math.bas.bg/vt/stemedu/book-1/04-STEMedu-2019.pdf>