

# ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРИЛОЖЕНИЕТО НА НОВИ МАТЕМАТИЧЕСКИ МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ НА КАРДИОЛОГИЧНИ ДАННИ

## INVESTIGATION OF THE APPLICATION OF NEW MATHEMATICAL METHODS FOR THE ANALYSIS OF CARDIAC DATA

**Mitko Gospodinov**

*Institute of Robotics*

*Bulgarian Academy of Sciences*

*mitgo@abv.bg*

### **Abstract**

*The article shows the results of the implementation of the first stage of the project "Study of the application of new mathematical methods for analysis of cardiac data", funded by the Research Fund. The results are related to the creation of a portable information system for individual monitoring of the cardiovascular system, which includes a portable device for recording photoplethysmographic (PPG) signals and software for processing, mathematical analysis and assessment of heart rate variability. An important advantage of the portable device is the ability to constantly monitor and record the functioning and parameters of the cardiovascular system of the individual. This allows more accurate diagnosis of patients in different life situations in normal life, which is based on subsequent scientific analysis of the registered cardiac information through developed specialized software using linear and nonlinear mathematical methods. The article also shows the results for validation of the created new device, by means of an experimental scheme with which electrocardiographic (ECG) and PPG signals are registered simultaneously. The obtained two types of signals are compared in terms of the accuracy parameter of the registered signals. The results show that the two types of registered signals are identical; therefore the developed portable device can be used as an alternative to the currently widely used ECG and Holter devices.*

**Keywords:** Heart Rate Variability, RR interval series, PP interval series, linear methods, nonlinear methods.

### **1. ВЪВЕДЕНИЕ**

През последните години ролята на информационните технологии в медицината нараства бързо, като се появяват нови, по-евтини и неболезнени методи за диагностика и изследвания. Една от многото области на научните изследвания в медицината, която дължи развитието си на информационните технологии, е анализът на електрокардиографски (ECG) и фотоплетизмографски (PPG) сигнали. За определяне количествените характеристики, оценяващи изменението на параметрите на сърдечния ритъм се използват ECG сигнали, които носят информация за варибилността на сърдечната честота (ВСЧ), отчитаща разликата между последователните удари на сърцето. Алтернативен подход при прилагането на методите за анализ на ВСЧ е регистрирането и обработката на сигнали, отчитащи периферната артериална пулсация на кръвта с помощта на фотоплетизмографски сензори [3-8]. Актуален е въпросът за

диагностичната и прогнозна стойност на съвместната регистрация, обработка и математически анализ на ECG и PPG сигнали. Този вид научни изследвания са от особена важност, защото резултатите от кардиологичния анализ на данните с приложение на съвременни математически методи могат да дадат не само подробна информация за физиологичното състояние на пациента, но и създават възможност за генериране на нови знания относно диагностицирането, прогнозирането и превенцията на патологията при сърдечно-съдовите заболявания [10-15]. Превенцията в медицината е важна не само за всеки човек, но и за обществото като цяло.

Заболяванията на сърдечно-съдовата система са едни от водещите причини за смърт в световен мащаб. Според статистиката, България е на първо място в Европа и на трето място в света по смъртност от сърдечно-съдови заболявания. По последни данни от сайта на Дружеството на кардиолозите в България над 70 хиляди души годишно умират от сърдечно-съдови заболявания. На тези болести се дължат два от всеки три смъртни случая в страната, отбелязват от Сдружението по кардиостимулация, които се позовават на данни на Европейската сърдечна асоциация.

Последните научно-изследователски данни показват, че сърдечно-съдовите заболявания могат да бъдат намалени чрез скринингови изследвания за ранното им откриване и прогнозиране, с цел намаляване на усложненията и подобряване на качеството на живот. Установено е, че ВСЧ са нелинейни и нестационарни сигнали и значителна част от информацията е закодирана в динамиката на техните флукуации в различни времеви периоди [1, 2, 9]. Много учени и научни колективи по света разработват и прилагат конвенционални (линейни) математически аналитични методи за изследване на сърдечната дейност. Резултатите от последните години показват, че част от важните свойства на динамиките на сигналите се изпускат, при използване само на линейните методи за анализ. Фундаменталните теоретични изследвания върху развитието и прилагането на нови нелинейни математически методи и знания на основата на фракталния, мултифракталния и уейвлет анализи ще позволи откриване на нови причини за явлението флукуации на ВСЧ.

**Целта на настоящата статия** е да се представят резултатите от изпълнението на първия етап на проект „Изследване на приложението на нови математически методи за анализ на кардиологични данни“, финансиран от Фонд Научни Изследвания, които са свързани със създаване, изследване на методи за математически анализ на кардиологични сигнали и данни и проектиране на експериментална портативна информационна система за наблюдение на пациенти със сърдечно-съдови заболявания. В статията ще бъдат показани и резултати за валидиране на създаденото ново устройство, посредством експериментална схема, с която едновременно се регистрират ECG и PPG сигнали. Получените два вида сигнали ще бъдат сравнени по отношение на параметъра точност на регистрираните сигнали.

## **2. ПОРТАТИВНА ИНФОРМАЦИОННА СИСТЕМА ЗА НАБЛЮДЕНИЕ НА ПАЦИЕНТИ СЪС СЪРДЕЧНО-СЪДОВИ ЗАБОЛЯВАНИЯ**

Биомедицинските сигнали, като PPG и ECG са физически проявления на физиологичните процеси, протичащи в човешкия организъм, които могат да бъдат измерени и представени под форма, удобна за обработка по електронен път. Обработката на тези сигнали се извършва с цел да се получат информативни данни от гледна точка на

медицинската диагностика или с цел да се определят диагностичните показатели на биосигнала. Познаването на параметрите и характеристиките на биологичните сигнали допълва клиничната картина на заболяването с обективна диагностична информация, което позволява да се прогнозира развитието на състоянието на пациента. Съвременните принципи за профилактика на сърдечно-съдовите заболявания са основани не само на борбата с причините за възникването им, но и с разработката на ефективни методи и устройства за диагностика, лечение и профилактика на тези заболявания.

Създадената портативна информационна система за наблюдение на пациенти със сърдечно-съдови заболявания се състои от следните два компонента:

- Портативно устройство за регистриране на PPG сигнали.
- Софтуер за предпроцесорна обработка, математически анализ и оценка на ВСЧ на времеви серии, получени посредством фотоплетизмографското устройство.

Портативното устройство има възможност да работи с 2 вида сензора за снемане на фотоплетизмографски сигнали, поставени на пръста на ръката и/или на ухото на пациента. PPG сензорната технология използва свойствата на светлината и чрез тях се установяват промените в артериалния кръвен обем в затворена зона (върха на пръста, ухото, носа, китката и др). Принципът на действие на PPG сензорите се основава на регистриране на промените, настъпващи в интензитета на светлината при отражение или предаване през тъканта. Тези разлики отразяват промените в кръвоносната перфузия на човешката тъкан. PPG сензорите могат да работят в два режима: режим на предаване и режим на отражение. При метода с отражение, светлинният източник и фотодетекторът са поставени от една и съща страна на тъканта, докато при метода с предаване – от две различни страни на тъканта. Създаденото експериментално устройство работи и с двата режима:

- Режим на предаване, чрез интегриран сензор, който е външен за устройството и е във вид на щипка за пръст и/или ухо.
- Режим на отражение, чрез дискретен сензор, който е вграден в устройството.

За да се валидира портативното устройство за регистриране на PPG сигнали е създадена експериментална система, която се състои от 2 сензора за снемане на фотоплетизмографски сигнали от пръста и ухото на пациента и 3 сензора за снемане на електрокардиограма. Регистрацията на двата вида сигнали се извършва едновременно.

За обработка и математически анализ на PPG сигналите, получени от фотоплетизмографското устройство и сигналите от ECG сензорите е създаден софтуер на Microsoft Visual C++, който е инсталиран на персонален компютър.

Математическият анализ на сигналите се извършва чрез прилагането на линейни и нелинейни математически методи. Количествените измерения на изследваните параметри при използването на линейните математически методи за анализ имат значимо клинично приложение, защото са известни границите норма-патология. Анализът на ВСЧ с използването на нелинейните математически методи могат да дадат не само подробна информация за физиологичното състояние на пациента, но и създават възможност за прогнозирането на бъдещи заболявания.

След регистрацията на ECG и PPG сигналите, чрез разработеният софтуер се определят интервалите между сърдечните удари: RR интервалите от ECG сигнала и PP интервалите от PPG сигнала. За да се демонстрира съпадението на интервалите между двата вида сигнали е определена средно-квадратичната грешка (Mean Square Error - MSE). Когато MSE клони към нула, това показва, че интервалите на двата вида сигнали са много близки, т.е двата сигнала са идентични.

### 3. РЕЗУЛТАТИ

#### 3.1. *Резултати, свързани с научен проект “Изследване на приложението на нови математически методи за анализ на кардиологични данни”*

Постигнатите научни резултати, свързани с изпълнението на научния проект “Изследване на приложението на нови математически методи за анализ на кардиологични данни“ досега са докладвани в 24 статии и доклада, които са класифицирани в следните две групи:

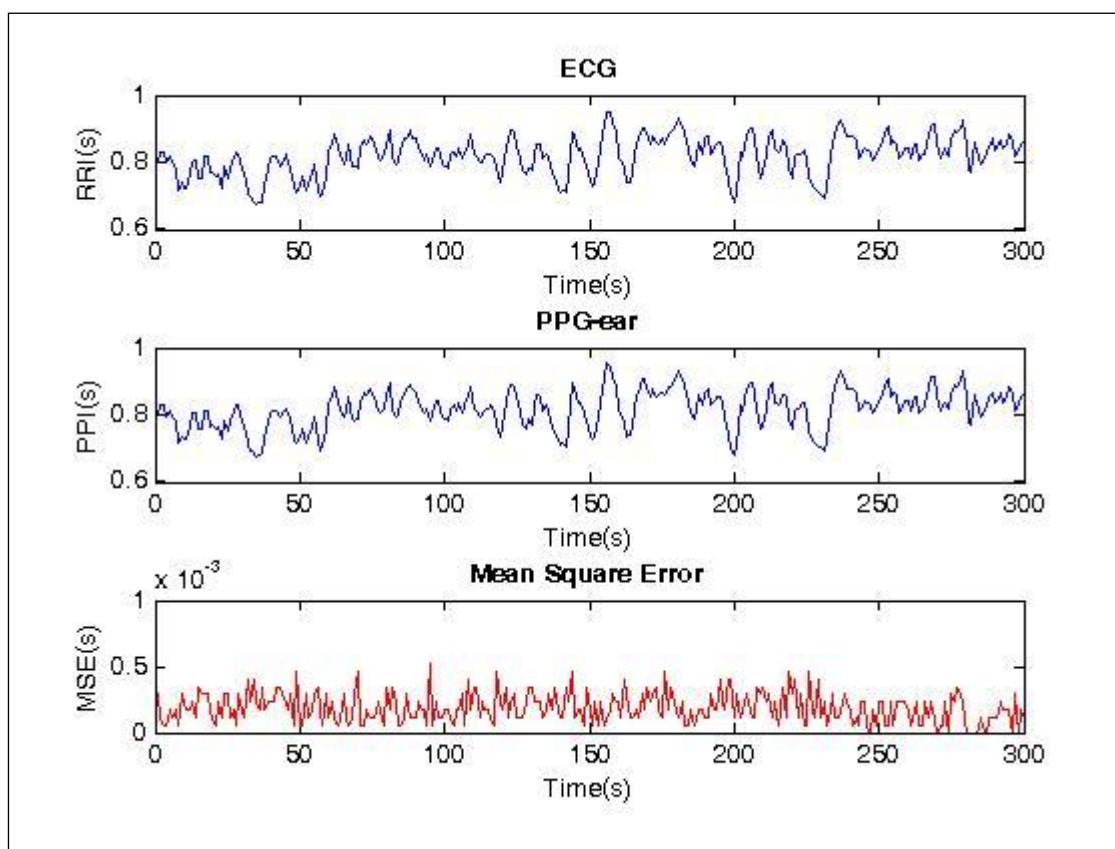
1. Резултати, свързани със създаване и изследване на портативно фотоплетизмографско устройство, за регистриране на PPG сигнали:
  - 1 статия в списание, индексирано от Scopus, Web of Science, IF=2.474 (2019), Q1 ранг;
  - 1 глава от книга;
  - 1 доклад на международна конференция, индексирана от Scopus;
  - 1 доклад на международна конференция с реално участие.
2. Резултати, свързани с математически анализ на PPG (ECG) сигнали:
  - 1 статия в списание, индексирано от Scopus, Web of Science, IF=3.110 (2019);
  - 1 статия в списание, индексирано от Scopus, Q2 ранг;
  - 1 статия в национално списание;
  - 2 статии в списания, индексирани от Scopus;
  - 7 доклада на международна конференция, индексирани от Scopus;
  - 8 доклада на международни конференции с виртуално и реално участие.

#### 3.2. *Резултати, свързани с валидиране на портативно устройство за регистриране на PPG сигнали*

Валидирането на създаденото ново портативно устройство е на базата на създадената експериментална схема. Регистрираните сигнали са сравнени по отношение на параметъра точност. На фиг. 1 са показани два 300 секундни сегмента, съответстващи на RR и PP интервалите, регистрирани от ECG сензорите и PPG сензора поставен на ухото, както и тяхната средно-квадратична грешка ( $MSE=0.0001881$ ). Данните се отнасят за здрав субект. Определената MSE е по-малка от 0.019%, което показва, че двата сигнала, снети чрез електрокардиографски и фотоплетизмографски начин са идентични. Подобен е резултатът и при сравняването на ECG сигнала и PPG сигнала, получен от сензора поставен на палеца на лявата ръка, като MSE е по-малка от 0.02%.

На базата на получените резултати, от направеното изследване могат да се направят следните изводи:

1. Средно-квадратичната грешка между PPG и ECG регистрираните сигнали е по-малка от 0.02%, следователно двата сигнала са идентични и предложеното ново портативно устройство може да се използва като алтернатива на широко използваните ECG и холтерни устройства.
2. Средно-квадратичната грешка е малко по-голяма при PPG сигнала снет от пръста на ръката в сравнение със сигнала, снет от ухото. Причината за това се дължи на следните физиологични особености:
  - мускулатурата на ухото в сравнение с пръста на ръката е по-малка;
  - върху ушната мида няма хрущялна тъкан;
  - пулсовата вълна достига до сензора на ухото по-бързо в сравнение със сензора поставен на пръста, поради по-голямата близост до сърцето.



**Фигура. 1.** Сравнение между RR и PP интервалите

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработката на нови модели преносими биомедицински устройства е важно направление в съвременната автоматизация на диагностичната дейност в медицината. Преносимите медицински устройства за компютърна диагностика на биосигнали са предназначени за автономно изследване на здравословното състояние на широк кръг потребители. Преносимата сърдечно-съдова диагностика е сред най-търсените медицински изделия. Прилагането на иновации в тази област ще доведе до широкото

използване на тези устройства с цел намаляване на смъртността от сърдечно-съдови заболявания. Интересът към този тип медицински устройства за автоматизиране на диагностичните дейности се дължи на възможността за непрекъснато наблюдение на пациентите в работни и домашни условия, което е резултат от политиката на много държави за повишаване здравословното състояние на населението.

Предметът на тази статия е да се представи образец на експериментална мултисензорна преносима информационна система за регистрация на ЕКГ сигнал и два вида PPG сигнали: пръст и ухо. От експерименталните проучвания, базирани на анализа на регистрираните интервални серии, съответстващи на RR и PP интервалите следва, че регистрираните сигнали от двата типа сензори са идентични.

Значението на създадената портативна информационна система се състои във формирането на параметрична и графична оценка на здравословното състояние на пациентите.

## БЛАГОДАРНОСТИ

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

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Acharya, U.R., Suri, J.S., Spaan, J.A.E., Krishnan, S.M., 2007. *Advances in Cardiac Signal Processing*, Springer: Berlin.
- [2] Acharya, U.R., Joseph, K.P., Kannathal, N., Lim, M., Suri, J.S., 2006. Heart rate variability: a review. *Med Bio Eng Comput*, 44, 031-1051.
- [3] Allen, J. 2007. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiological Measurement*, 28(3), R1-39.
- [4] Analog Devices, 2012, Single-Lead, Heart Rate Monitor Front End, AD8232 Data Sheet, Available: [www.analog.com](http://www.analog.com)
- [5] Arduino mega 2560, 2019. Technical Specification. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>
- [6] Botman, S., Borchevkin, D., Petrov, V., Bogdanov, E., Patrushev, M., Shusharina, N. 2015. Photoplethysmography-Based Device Designing for Cardiovascular System Diagnostics. *International Journal of Biomedical and Biological Engineering*, 9(9), 689-693.
- [7] Celik, N., Balachandran, W., Manivannan, N. 2015. Ear-lead multiple smart bio sensor system in m-health. *Proceedings of the 10th EAI International Conference on Body Area Networks*, 39-43.
- [8] Elgendi, M., Fletcher, R., Liang, Y., Howard, N., Lovell, N., Abbott, D., Lim, K., and Ward, R. 2019. The use of photoplethysmography for assessing hypertension. *npj Digit. Med.* 2, 60. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0136-7>.
- [9] Ernst, G. 2014. *Heart Rate Variability*. Springer-Verlag: London.
- [10] Georgieva-Tsaneva, G. 2019. Frequency Analysis of Cardiac Data Obtained through Holter Monitoring in Real Living Conditions. *CBU International Conference Proceedings*, 7, DOI:10.12955/cbup.v7.1498, 870-874, <https://ojs.journals.cz/index.php/CBUIC/article/view/1498>
- [11] Georgieva-Tsaneva, G. 2019. Investigation of Heart Rate Variability by Statistical Methods and Detrended Fluctuation Analysis. *CBU International Conference Proceedings 2019*, 7, DOI:10.12955/cbup.v7.1446, 729-734 <https://ojs.journals.cz/index.php/CBUIC/article/view/1446>

- [12] Gospodinova, E., 2019. Graphical methods for non-linear analysis of electrocardiographic data. *CBU International Conference Proceedings 2019: Innovations in Science and Education*, 7, 864-869, DOI:<https://doi.org/10.12955/cbup.v7.1497>, <https://ojs.journals.cz/index.php/CBUIC/article/view/1497/2033>
- [13] Gospodinova, E., 2019. Time Series Analysis Using Fractal and Multifractal Methods. *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/10.1145/3345252.3345265>, 188-193. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3345252.3345265>
- [14] Todorov, T., Bogdanova, G., Noev, N., Sabev, N. 2019. Data management in a Holter Monitoring System, *TEM Journal*, 8(3), 801-805.
- [15] 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>