

УДК 004.942(45)

DOI: 10.20535/.2026.2(22).361232

КОМП'ЮТЕРНІ ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Архирей Марина Володимирівна

marina_arkhyrei@ukr.net

Іванець Ольга Борисівна

olchik2104@ukr.net

Світлов Павло Костянтинівич

svietlov@lil.kpi.ua

Сапон Ольга Сергіївна

o.sapon-fbmi26@lil.kpi.ua

Кафедра біомедичної інженерії

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

м. Київ, Україна

Анотація – У статті розглянуто актуальне практичне завдання дослідження нелінійності динамічних об'єктів, з використанням сучасних комп'ютерних технологій, для аналізу хаотичної складової та нестационарності часового ряду. В якості часового ряду в роботі розглянута сукупність вимірних параметрів серцево-судинної системи. Наведені приклади побудови та аналізу рекурентних діаграм із використанням методу квантифікації рекурентності (RQA), що дозволяє врахувати притаманну хаотичну природу процесів в організмі людини.

Використання кольорових та чорно-білих рекурентних діаграм надало змогу отримати візуальні та аналітичні відмінності в динаміці часових рядів біомедичних параметрів учасників дослідження. Встановлено, що надмірна детермінованість та висока ламінарність фазових траєкторій, що відповідають різним станом динамічної системи є негативною ознакою, що свідчить про інертність гомеостазу та зниження адаптивного резерву організму до зовнішніх дестабілізуючих факторів. Натомість наявність хаотичної складової вказує на ефективну роботу біологічних зворотних зв'язків. Основним науковим результатом роботи є обґрунтування застосування технологій рекурентного аналізу як ефективного інструменту для оцінки функціональної стабільності та адаптаційної поведінки біологічних систем, у реальному часі.

Ключові слова: цифрові технології, рекурентна діаграма, варіабельність серцевого ритму, квантифікація рекурентності (RQA), гомеостаз, ламінарність, адаптивні резерви, біомедичні сигнали..

I. ВСТУП

Оцінювання складних динамічних об'єктів вимагає інтелектуальних підходів для аналізу даних з використанням цифрових технологій для виявлення прихованих закономірностей у вже існуючих наборах даних для отримання додаткової інформації про динаміку досліджуваної системи з метою визначення її функціональної стабільності та повторюваності станів, що дана система демонструє. Динамічний об'єкт розглядається як система, стан якої змінюється в часі під впливом внутрішніх та зовнішніх факторів, що часто супроводжується нелінійними та нестационарними процесами. У роботі досліджується застосування рекурентних

діаграм та їх кількісного аналізу для оцінювання стану таких систем. Показано, що рекурентні діаграми є ефективним інструментом для виявлення структурних змін у часових рядах, зокрема у випадках стохастичного впливу, який адекватно відображає динаміку системи. Проведено аналіз часових рядів сигналу, що використовується як вхідний масив даних для побудови рекурентних діаграм. Метою дослідження є поєднання візуальної інтерпретації рекурентних діаграм із розрахунком їх кількісних характеристик для підтвердження висновків щодо стабільності функціонування динамічного об'єкта

II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ В ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ

У сучасних наукових дослідженнях аналіз динамічних об'єктів є одним із ключових напрямів. Особливу увагу при дослідженні складних технічних, економічних, екологічних та біомедичних систем, зокрема, приділяється аналізу їхньої нелінійності, нестаціонарності та особливостям впливу випадкових факторів, що формують складну динаміку поведінки зазначених систем. Динамічний об'єкт визначається як система, стан якої змінюється у часі під дією внутрішніх процесів і зовнішніх збурень. Це ускладнює процес її моделювання та прогнозування традиційними методами, що можуть виявитися недостатньо ефективними для виявлення прихованих закономірностей у таких системах.

Дослідження, що були проведені в Навчально-науковій лабораторії клінічної інженерії, з використанням наявного обладнання, надали змогу визначити, що традиційні методи аналізу біомедичних сигналів на основі часових рядів можуть бути доповнені методами, що дозволяють виявити приховані закономірності за рахунок аналізу динаміки траєкторій часового ряду у фазовому просторі.

У зв'язку з цим набувають актуальності методи, що описують складну динаміку еволюції біологічної системи, зокрема аналіз рекурентних діаграм. Такий підхід дозволяє досліджувати структуру фазового простору динамічної системи та виявляти повторювані стани, які дана система проходить у своїй еволюції. Рекурентні діаграми забезпечують наочне відображення еволюції системи, а їх кількісний аналіз (*Recurrence Quantification Analysis, RQA*) дає можливість отримати об'єктивні характеристики динаміки процесів даної системи. Особливий інтерес викликають дослідження сигналів зі стохастичною складовою. В них адекватно відображається зміна стану динамічного об'єкта. Аналіз часових рядів відкриває можливості для

оцінювання стабільності функціонування системи та виявлення критичних змін у її поведінці

Таким чином, застосування рекурентних діаграм у поєднанні з їх кількісними показниками є перспективним підходом до комплексного аналізу динамічних систем, що і зумовлює актуальність даного дослідження.

III. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Останнім часом активно розвиваються методи, що враховують нелінійну складову динамічних складних систем [1, 2]. Оскільки людський організм є саме такою системою, дослідники дедалі частіше застосовують теорію динамічного хаосу та фрактальний аналіз для оцінки його стану [3–6]. Зокрема, ці підходи виявилися ефективними у вивченні варіабельності серцевого ритму [5, 9, 10]. Ключовою особливістю біосистем є рекурентність — здатність повертатися до стабільного стану завдяки гомеостазу, що відображається у зближенні фазових траєкторій загальної поведінки системи.

На відміну від технічних систем, біологічні об'єкти мають унікальну властивість відновлюватися після зовнішніх збурень завдяки гнучкості внутрішнього гомеостазу. Графічно це проявляється у зближенні траєкторій у фазовому просторі [13]. Проте нелінійність і складність живих систем потребують глибшого вивчення, ніж пропонують традиційні технології. Зокрема, аналіз хаотичних процесів дозволяє виявити приховані закономірності внутрішньої регуляції, що і стало головним завданням даного дослідження

IV. МЕТА СТАТТІ

Метою даного дослідження є комплексний аналіз динамічної стійкості біологічної системи з використанням часового ряду варіабельності серцевого ритму на основі методів нелінійної динаміки та теорії хаосу, що передбачає виявлення

прихованих закономірностей у фазових траєкторіях кардіосигналу та оцінку ефективності механізмів гомеостатичного регулювання серцево-судинної системи за умов дестабілюючих впливів.

V. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для аналізу стану біологічної системи зміни її станів x у часі t представляються у вигляді часових рядів:

$$x^1(t), x^2(t), \dots, x^m(t)$$

Сукупність цих змінних формує вектор стану в m -вимірному фазовому просторі. Метод рекурентних діаграм (RP) дозволяє досліджувати траєкторію системи у такому фазовому просторі. Повторюваність станів відображається у вигляді квадратної матриці, заповненої одиницями та нулями. Графічно така матриця візуалізується як набір чорних («1») та білих («0») точок.

Таким чином, рекурентна діаграма забезпечує наочне представлення повторюваності станів біологічної системи.

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon_i - \|x_i - x_j\|), \quad x \in \mathbb{R}^m, \\ i, j = 1 \dots N$$

де ε_i – «радіус околу» тобто розмір околу точки x у момент часу t , Θ – функція Хевісайда, $\|x_i - x_j\|$ – відстань (норма) між векторами станів x_i та x_j у фазовому просторі \mathbb{R}^m у відповідні моменти часу i та j .

Однакова ймовірність повторення рекурентних моментів дозволяє оцінити динамічний потенціал системи. Проте

окрема рекурентна точка (i, j) не несе вичерпної інформації про стан динамічної системи у ці моменти, оскільки рекурентні стани складної біологічної системи не є ідентичними, а лише з часом повертаються у близькість до попереднього стану. Отже, динаміка біологічної системи проявляється у переході до стану x_j , що є близьким до стану x_i , тому такі стани є рекурентними, що відображається у m -вимірному просторі околі точки x_i радіуса ε . Ці точки є точками повернення і, як випливає з формули (1), вони описують функціонування системи залежно від обраних параметрів моделювання.

Саме ці параметри були враховані при розрахунку кількісних показників рекурентних діаграм (RQA). Для дослідження часового ряду варіабельності серцевого ритму проведений аналіз групи учасників дослідження з використанням відкритої бази даних ресурсу PhysioNet.org [14]. Вхідний масив даних двох з учасників дослідження (під номером 103 та 106 відповідно) поданий на рисунку 1 та на рисунку 2. Наведені часові ряди були оброблені в середовищі *MATLAB* [15]. Результати візуалізації фазових портретів динаміки зміни зазначених часових рядів у вигляді кольорових та бінарних рекурентних діаграм подані на рисунку 3 та рисунку 4 для учасника дослідження під номером 103 та на рисунку 5 та рисунку 6 для учасника дослідження 106, відповідно.

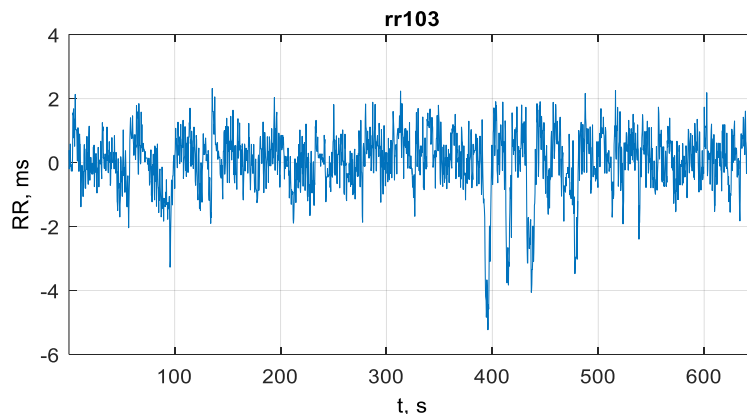


Рисунок 1 – Варіабельність серцевого ритму учасника дослідження під номером 103

Окрему рекурентну точку (i, j) не варто розглядати як вичерпне джерело інформації про стан біологічної системи. Натомість саме сукупність таких точок формує цілісну картину, що дозволяє детально реконструювати динаміку системи. Побудова рекурентної діаграми базується на головній діагоналі (лінії ідентичності), де чорні точки вказують на збіг станів у різні моменти часу. Ця лінія розташована під кутом 45° до осей

координат. Аналіз такої діаграми дає змогу ідентифікувати трансформаційні процеси в біосистемі, особливості біологічного зворотного зв'язку, вплив дестабілізуючих чинників, періоди стагнації (ламінарності), а також критичні фазові переходи чи раптові зміни стану, а також виявити екстремальні рідкісні епохи, що свідчать про значне відхилення від загальної траєкторії.

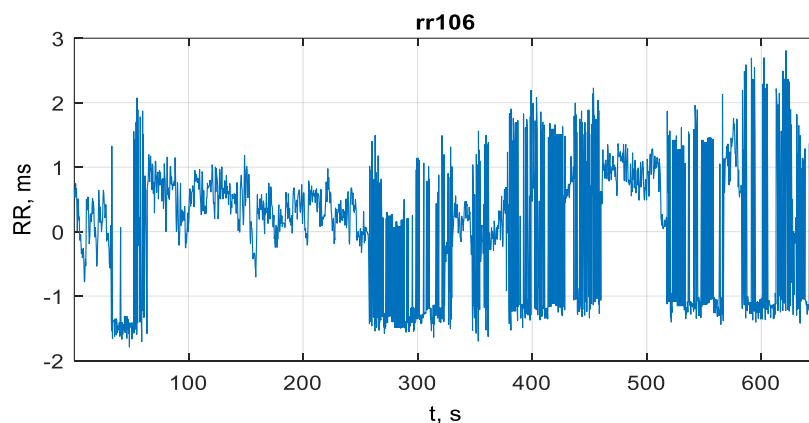


Рисунок 2 – Варіабельність серцевого ритму учасника дослідження під номером 106

Для аналізу процесів у біологічних системах використання рекурентних графіків дозволяє візуалізувати процеси в динаміці системи. Це особливо важливо при оцінюванні поточного стану здорової групи осіб, для яких здійснений професійних відбір та чия професійна діяльність пов'язана з екстремальними факторами, а порушення адаптаційного потенціалу може не проявлятися в явному вигляді а мати приховану повторюваність, що може бути візуалізована нелінійними методами. Тому здатність рекурентних діаграм виявляти рідкісні та екстремальні події у вигляді повторюваних графіків є важливим інструментом для оцінки стану біологічних об'єктів. Аналіз текстур, що утворюються завдяки структурі рекурентних діаграм, дозволяє аналізувати перебіг процесів у біологічних системах.

Вертикальні та горизонтальні лінії ($R_{i,j+k} = 1$, де $k = 1 \dots v$, де v — довжина

вертикальної або горизонтальної лінії) відокремлюють часові інтервали, у яких стан системи не змінюється або змінюється незначно (система на цей час ніби «заморожена»), що є ознакою «ламінарних» станів [16].

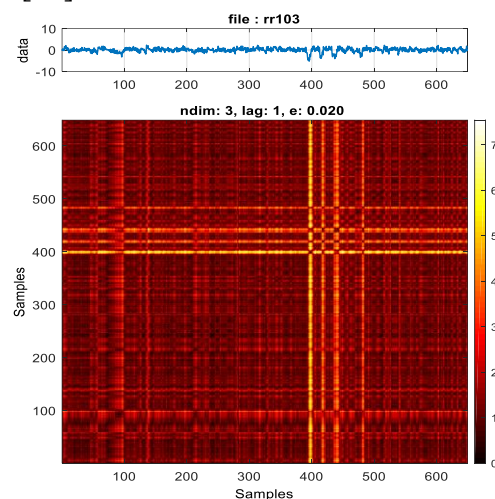


Рисунок 3 – Кольорові рекурентні діаграми варіабельності серцевого ритму учасника дослідження під номером 103

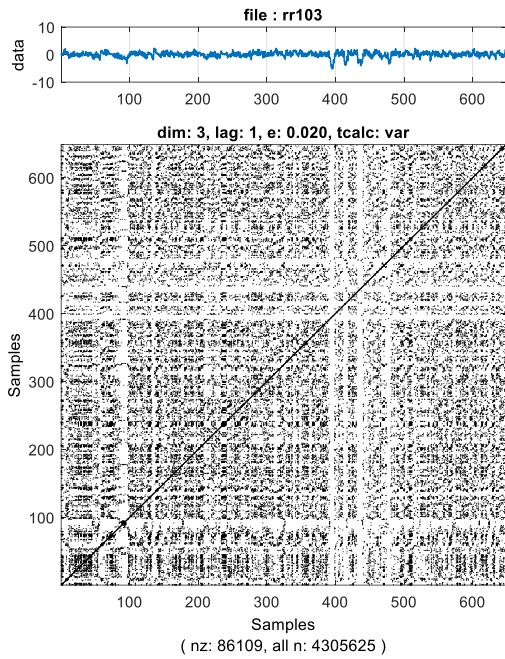


Рисунок 4 – Бінарна рекурентна діаграма варіабельності серцевого ритму учасника дослідження під номером 103

Для обчислення довжини найдовшої діагоналі був застосований наступний математичний вираз:

$$L_{max} = \max(l_i; i=1, \dots, Nl).$$

Де N — загальна кількість діагональних ліній, а l_i — довжина i -ї лінії. Якщо два сегменти фазової траєкторії зближуються протягом l - кроків у різні моменти часу, формується діагональна лінія відповідної довжини. Середня довжина таких ліній відображає тривалість синхронного руху ділянок траєкторії та еквівалентна середньому часу прогнозу та може бути розрахована за формулою:

$$L = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N IP(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P(l)}$$

Аналіз рекурентних характеристик дозволив кількісно оцінити нелінійну динаміку біологічних систем. Для учасника №103 середня довжина діагональних ліній L_{mean} склала 2,56, тоді як для учасника №106 — 3,22. Показники L_{max} становили 20 та 35 одиниць відповідно. Оскільки L_{max} є обернено пропорційним до найбільшого доданого показника Ляпунова, він виступає

ключовим параметром оцінки хаотичності: вище значення L_{max} у другого учасника (№106) вказує на низьку швидкість розбіжності фазових траєкторій.

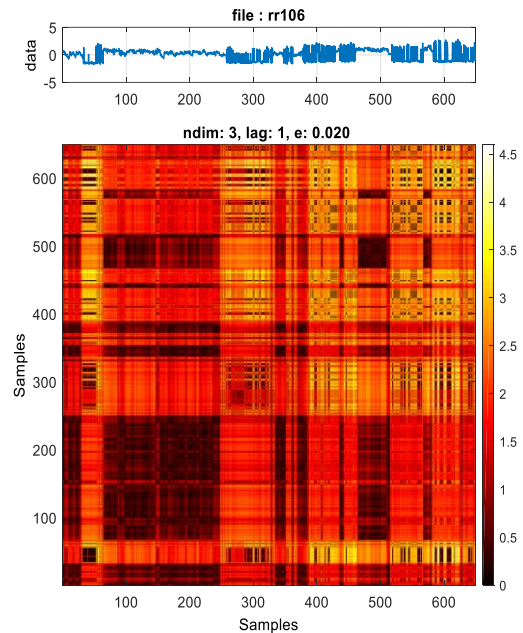


Рисунок 5 – Кольорова рекурентна діаграма варіабельності серцевого ритму учасника дослідження під номером 106

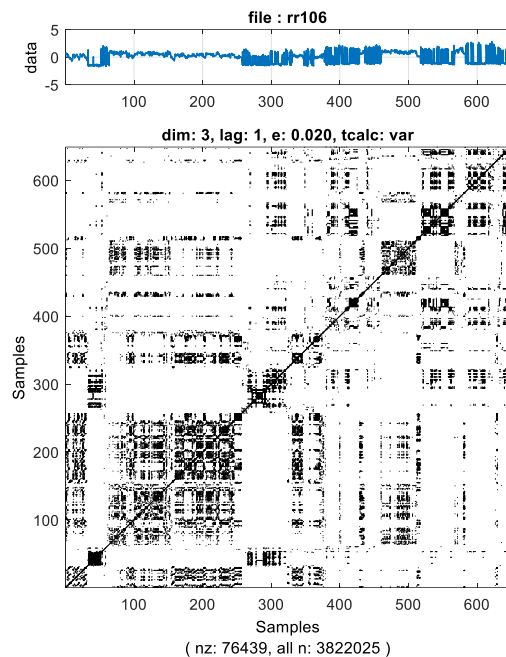


Рисунок 6 – Бінарна рекурентна діаграма варіабельності серцевого ритму учасника дослідження під номером 106

Додатні показники Ляпунова вимірюють швидкість розбіжності траєкторій і є ознаками динамічного хаосу; відповідно, чим меншим є показник $Lmax$, тим хаотичнішим є перебіг процесів у біологічній системі. Проте, на відміну від технічних систем, наявність хаотичних процесів у живому організмі свідчить про ефективність роботи гомеостазу як внутрішнього регулятора. Біологічні зворотні зв'язки, реагуючи на зовнішні дестабілізуючі фактори, компенсують їхній вплив за рахунок адаптивних резервів організму. Також для оцінки ламінарності (стаціонарності) процесів було розраховано середню довжину вертикальних структур за виразом.

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N vP(v)}{\sum_{v=v_{\min}}^N P(v)}$$

що характеризує середній час затримки системи в певному стані (*Trapping Time*). Для учасників дослідження ці значення становлять $TT1 = 2,874$ та $TT2 = 3,257$ відповідно.

Встановлено, що нижчі значення $Lmax$ та TT у першого учасника свідчать про вищий рівень динамічного хаосу, що є фізіологічною ознакою гнучкої адаптивності гомеостазу. Натомість показники другого учасника демонструють стан надмірної детермінованості та динамічної ригідності. Зниження хаотичної складової вказує на вичерпання регуляторного ресурсу, що обмежує здатність організму до пластичної відповіді на зовнішні дестабілізуючі чинники. Таким чином, параметри RQA можуть слугувати об'єктивними предикторами ранніх функціональних розладів [17].

VI. ВИСНОВКИ

Результати проведеного дослідження підтверджують, що застосування аналізу квантифікації рекурентності (RQA) до обробки біомедичних сигналів дозволяє ідентифікувати латентну динаміку біологічних процесів, недоступну для стандартних методів аналізу. Кількісні

показники $Lmax$ та TT виступають об'єктивними критеріями оцінки функціонального стану організму: для учасника дослідження №103 нижчі значення цих параметрів вказують на вищий рівень динамічної складності, що є ознакою адаптивної пластичності та ефективності гомеостатичного регулювання. Натомість показники учасника дослідження №106 свідчать про аномально високу ламінарність та надмірну детермінованість системи. Така динамічна ригідність сигналізує про вичерпання регуляторного ресурсу та зниження здатності організму до гнучкого реагування на зовнішні дестабілізуючі чинники. Візуалізація рекурентних діаграм підтверджує ці висновки, демонструючи, що нівелювання хаотичної складової може слугувати діагностичним маркером функціональних порушень. Таким чином, запропонований підхід зменшує невизначеність при оцінюванні стабільності біологічних систем і відкриває перспективи для ранньої діагностики станів, пов'язаних із порушенням адаптаційних можливостей організму.

ORCID ID та внесок авторів

[0000-0002-2200-8404](https://orcid.org/0000-0002-2200-8404) (A, D) Maryna

Arkhyrei

[0000-0002-0897-4219](https://orcid.org/0000-0002-0897-4219) (E, F) Olga Ivanets

[0009-0007-1104-2934](https://orcid.org/0009-0007-1104-2934) (B) Pavlo Sviatlov

[0009-0008-3340-2045](https://orcid.org/0009-0008-3340-2045) (C) Olha Sapon

A – концепція та дизайн роботи, B – пошук матеріалів, C – аналіз існуючих досліджень, D – написання статті, E – критичний огляд статті, F – остаточне затвердження статті

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- Ott, E. Chaos in Dynamical Systems; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2002. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511803260>.
- Xiong, W., Faes, L., Ivanov P.C. Entropy measures, entropy estimators, and their performance in quantifying complex dynamics: Effects of artifacts, nonstationarity, and long-range correlations. Phys. Rev. E 2017, 95, 062114. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.062114>
- De Godoy, M.F. Nonlinear analysis of heart rate variability: A comprehensive review. J. Cardiol. Ther. 2016, 3, 528–533. <https://doi.org/10.17554/j.issn.2309-6861.2016.03.101-4>

4. Ivanets, O., Morozova, I. Features of Evaluation of Complex Objects with Stochastic Parameters. 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2021. Proceedings, 2021, pp. 159–162. <https://doi.org/10.1109/ACIT52158.2021.9548480>

5. Hastings H. Fractal geometry in biological systems: An analytical approach edited by Phillip M. Iannacone and Mustafa Khokha. Bulletin of Mathematical Biology. 1997;59(4):791–794. <https://doi.org/10.1007/BF02459483>

6. Voss, A.; Schulz, S.; Schroeder, R.; Baumert, M.; Caminal, P. Methods derived from nonlinear dynamics for analysing heart rate variability. Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A 2008, 367, 277–296. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0232>

7. Kuzmin V., Ivanets O., Zaliskyi M., Shcherbyna O., Holubnychyi O., Sevriukova O. Methods for Time Series Analysis Using Segmented Regression with Heteroskedasticity. Proceedings of Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. 2023 https://doi.org/10.1007/978-3-031-61415-6_43

8. Deka, B., Deka, D. Nonlinear analysis of heart rate variability signals in meditative state: a review and perspective. BioMed Eng OnLine 22, 35 (2023). <https://doi.org/10.1186/s12938-023-01100-3>

9. Іванець О.Б., Буриченко М.Ю., Архирей М.В., Братко В.Ю. Особливості використання методів нелінійної динаміки для обробки біомедичних даних. Наукові технології. 2022. N4(56):C.317-334 ISSN 2075-078, doi.org/10.18372/2310-5461.56.17131

10. Nayak, S.K.; Bit, A.; Dey, A.; Mohapatra, B.; Pal, K. A review on the nonlinear dynamical system analysis of electrocardiogram signal. J. Healthcare Eng. 2018. doi.org/10.1155/2018/6920420

11. Henriques T, Ribeiro M, Teixeira A, Castro L, Antunes L, Costa-Santos C. Nonlinear Methods Most Applied to Heart-Rate Time Series: A Review. Entropy. 2020; 22(3):309. <https://doi.org/10.3390/e22030309>

12. Norris P.R. Heart rate multiscale entropy at three hours predicts hospital mortality in 3,154 trauma patients / P.R. Norris, S.M. Anderson, J.M. Jenkins, et al// Shock. – 2008. Vol.30, No.1. – P.17-22. DOI: [10.1097/SHK.0b013e318164e4d0](https://doi.org/10.1097/SHK.0b013e318164e4d0).

13. Mansier, P.; Clairambault, J.; Charlotte, N.; Médigue, C.; Vermeiren, C.; LePape, G.; Carré, F.; Gounaropoulou, A.; Swynghedauw, B. Linear and non-linear analyses of heart rate variability: A minireview. Cardiovasc. Res. 1996, 31, 371–379. [https://doi.org/10.1016/0008-6363\(96\)00009-8](https://doi.org/10.1016/0008-6363(96)00009-8)

14. <https://archive.physionet.org/physiobank/database/>

15. Simple MATLAB functions for calculating recurrence plots and recurrence quantification, <https://github.com/pucicu/>.

16. Webber, C. L., Zbilut, J. P. Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. https://www.researchgate.net/publication/228680523_Recurrence_quantification_analysis_of_nonlinear_dynamical_systems. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4116.8248>

17. Roy B, Ghatak S. Nonlinear methods to assess changes in heart rate variability in type 2 diabetic patients. Arq Bras Cardiol. 2013 Oct;101(4):317-27. doi: [10.5935/abc.20130181](https://doi.org/10.5935/abc.20130181). Epub 2013 Sep 6. PMID: 24008652; PMCID: PMC4062368

REFERENCES

1. Ott, E. Chaos in Dynamical Systems; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2002. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511803260>.

2. Xiong, W., Faes, L., Ivanov P.C. Entropy measures, entropy estimators, and their performance in quantifying complex dynamics: Effects of artifacts, nonstationarity, and long-range correlations. Phys. Rev. E 2017, 95, 062114. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.062114>

3. De Godoy, M.F. Nonlinear analysis of heart rate variability: A comprehensive review. J. Cardiol. Ther. 2016, 3, 528–533. <https://doi.org/10.17554/j.issn.2309-6861.2016.03.101-4>

4. Ivanets, O., Morozova, I. Features of Evaluation of Complex Objects with Stochastic Parameters. 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2021. Proceedings, 2021, pp. 159–162. <https://doi.org/10.1109/ACIT52158.2021.9548480>

5. Hastings H. Fractal geometry in biological systems: An analytical approach edited by Phillip M. Iannacone and Mustafa Khokha. Bulletin of Mathematical Biology. 1997;59(4):791–794. <https://doi.org/10.1007/BF02459483>

6. Voss, A.; Schulz, S.; Schroeder, R.; Baumert, M.; Caminal, P. Methods derived from nonlinear dynamics for analysing heart rate variability. Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A 2008, 367, 277–296. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0232>

7. Kuzmin V., Ivanets O., Zaliskyi M., Shcherbyna O., Holubnychyi O., Sevriukova O. Methods for Time Series Analysis Using Segmented Regression with Heteroskedasticity. Proceedings of Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. 2023 https://doi.org/10.1007/978-3-031-61415-6_43

8. Deka, B., Deka, D. Nonlinear analysis of heart rate variability signals in meditative state: a review and perspective. BioMed Eng OnLine 22, 35 (2023). <https://doi.org/10.1186/s12938-023-01100-3>

9. Ivanets O.B., Burichenko M.Yu., Arkhyrei M.V., Bratko V.Yu. Peculiarities of using nonlinear dynamics methods for biomedical data processing. Scientific technologies. 2022. N4(56):P.317-334 ISSN 2075-078, doi.org/10.18372/2310-5461.56.17131

10. Nayak, S.K.; Bit, A.; Dey, A.; Mohapatra, B.; Pal, K. A review on the nonlinear dynamical system analysis of electrocardiogram signal. J. Healthcare Eng. 2018. doi.org/10.1155/2018/6920420

11. Henriques T, Ribeiro M, Teixeira A, Castro L, Antunes L, Costa-Santos C. Nonlinear Methods Most Applied to Heart-Rate Time Series: A Review. Entropy. 2020; 22(3):309. <https://doi.org/10.3390/e22030309>

12. Norris P.R. Heart rate multiscale entropy at three hours predicts hospital mortality in 3,154 trauma patients / P.R. Norris, S.M. Anderson, J.M. Jenkins, et al// Shock. – 2008. Vol.30, No.1. – P.17-22. DOI: [10.1097/SHK.0b013e318164e4d0](https://doi.org/10.1097/SHK.0b013e318164e4d0).

13. Mansier, P.; Clairambault, J.; Charlotte, N.; Médigue, C.; Vermeiren, C.; LePape, G.; Carré, F.; Gounaropoulou, A.; Swynghedauw, B. Linear and non-linear analyses of heart rate variability: A minireview. Cardiovasc. Res. 1996, 31, 371–379. [https://doi.org/10.1016/0008-6363\(96\)00009-8](https://doi.org/10.1016/0008-6363(96)00009-8)

14. <https://archive.physionet.org/physiobank/database/>

15. Simple MATLAB functions for calculating recurrence plots and recurrence quantification, <https://github.com/pucicu/>.

16. Webber, C. L., Zbilut, J. P. Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. https://www.researchgate.net/publication/228680523_Reurrence_quantification_analysis_of_nonlinear_dynamical_systems. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4116.8248>
17. Roy B, Ghatak S. Nonlinear methods to assess changes in heart rate variability in type 2 diabetic patients. *Arq Bras Cardiol.* 2013 Oct;101(4):317-27. doi: [10.5935/abc.20130181](https://doi.org/10.5935/abc.20130181). Epub 2013 Sep 6. PMID: 24008652; PMCID: PMC4062368.

UDC 004.942(45)

DIGITAL COMPUTER TECHNOLOGIES FOR ASSESSING DYNAMIC OBJECTS

Maryna Arkhyrei

marina_arkhyrei@ukr.net

Olga Ivanets

olchik2104@ukr.net

Pavlo Svietlov

svietlov@lil.kpi.ua

Olha Sapon

o.sapon-fbmi26@lil.kpi.ua

*Department of Biomedical Engineering
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine*

Abstract – The article addresses the problem of extracting additional diagnostic information from biomedical signals to minimize uncertainty in assessing the functional state of biological systems. The methodology for constructing and analyzing recurrence plots using the Recurrence Quantification Analysis (RQA) method is presented, allowing for the consideration of the inherent chaotic nature of processes within the human body. Through examples of color and black-and-white recurrence plots, visual and analytical differences in the dynamics of the research participants are demonstrated. It was established that excessive determinism and high laminarity of biorhythms are negative indicators, signaling homeostatic inertia and a reduction in the body's adaptive capacity to external destabilizing factors. Conversely, the presence of a chaotic component indicates the effective functioning of biological feedback mechanisms. The primary scientific contribution of this work is the substantiation of recurrence analysis technologies as an effective tool for evaluating the stability and adaptive potential of biological systems in real-time.

Keywords: digital technologies, recurrence plot, heart rate variability, recurrence quantification analysis (RQA), homeostasis, laminarity, adaptive reserves, biomedical signals.