

О. Б. Іванець, канд. техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-0897-4219
e-mail: olchik2104@ukr.net;

М. Ю. Буриченко, канд. техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-7846-2104
e-mail: bmu044@gmail.com;

М. В. Архирей
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-2200-8404
e-mail: marina_arkhyrei@ukr.net;

В. Ю. Братко
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-3772-4446
e-mail: bratko2022@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ ДЛЯ ОБРОБКИ БІОМЕДИЧНИХ ДАНИХ

Вступ

Своєчасна діагностика та прогнозування проблем зі здоров'ям є одним із найважливіших завдань безпеки людини. Використання аналізу параметрів серцево-судинної системи для аналізу функціональної стабільності пов'язана з її вразливістю до факторів дестабілізації. Тому вважається, що саме параметри серцево-судинної системи є найбільш інформативними з точки зору оцінювання біологічного дисбалансу [1]. Але класичний підхід до аналізу кардіосигналів в часовій та частотній областях виявив, що формування кардіосигналу має більш складну структуру ніж можна описати за допомогою класичних підходів [2]. Тому сьогодні все більше додаткових методів використовується для підвищення надійності обробки кардіосигналів, але дослідження саме емпіричних даних для встановлення кореляції між класичними та новими підходами в аналізі сигналів кардіоритму є актуальним завданням. Варіабельність серцевого ритму (ВСР) є одним з найбільш перспективних показників для визначення аналізу кількісних досліджень показників вегетативної активності серця. На сьогоднішній день використовуються різні підходи до автоматизації як процесу вимірювання так і процесу обробки ВСР, однак значення і важливість багатьох показників ВСР більш складні, ніж прийнято вважати. Тому дослідження методів нелінійної динаміки для оцінювання

складних процесів серцево-судинного ритму надасть змогу отримати додаткову інформацію про стан як самої серцево-судинної системи так і про стабільність функціонування всього організму в цілому та надасть більше потенційних можливостей при прийнятті рішень та обґрунтування екстраполяцій [3]. Таке представлення дозволяє окрім кількісних значень медико-біологічних параметрів отримати додаткову інформацію про динамічні зміни стану системи в різні проміжки часу. При чому час впродовж якого отримані зазначені емпіричні дані також має інформаційну складову. Більшість медико-біологічних параметрів таких як електрокардіограми, електроенцефалограми, електроміограми, характеризують як лінійні фізіологічні процеси так і мають в собі складову, що описує певні нелінійні процеси в організмі як реакцію організму на зовнішні дестабілізуючі впливи. В той час як лінійна складова системи, з певною достовірністю, описана класичними методами інтелектуального аналізу, нелінійні процеси в організмі описані та досліджені недостатньо. Нелінійний феномен є однією з причин варіабельності медико-біологічних параметрів, варіабельності серцевого ритму зокрема. Останнім часом все більше досліджень доводять необхідність вивчення нелінійної складової біологічних процесів для отримання, по-перше додаткової інформації про трансформацію біологічних процесів за рахунок зворотних біологічних зв'язків,

для забезпечення рівноваги функціонування, а по-друге для аналізу хаотичності процесів, що відбуваються в організмі.

Постановка проблеми в загальному вигляді

У зв'язку з тим, що при прийнятті рішення щодо стабільності функціонування організму виникає необхідність оцінювання стану даного об'єкту за певними показниками для зменшення інформаційної невизначеності, необхідне дослідження різних методів, що дозволяють вивчити перетворення інформаційних параметрів в різні моменти часу. При вивченні складної динаміки параметрів серцево-судинної системи класичний підхід на основі аналітичних обчислень індивідуальних траєкторій, наприклад на основі диференціальних рівнянь не працює. За цією причиною постає необхідність дослідження функціональної стійкості організму на основі вивчення ролі інваріантних різноманітностей перетворення інформаційних параметрів серцево-судинної системи, аналізу геометричної структури траєкторій часових рядів, сформованих на основі кардіосигналу. Хоча такий підхід і не дає змоги представити рішення у явному вигляді, але він дозволяє якісно описати багато важливих особливостей організму як динамічної системи. З огляду на нелінійність такої динамічної системи використання методів нелінійної динаміки дозволяє дослідити хаотичність процесів в організмі, що представлені в просторі станів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Варіабельність серцевого ритму тісно пов'язана з нелінійними явищами. Така не лінійність пов'язана зі складними процесами взаємодіями вду та впливом центральної та вегетативної нервової систем як реакції на зовнішні фактори дестабілізації. Використання аналізу ВСП на основі методах нелінійної динаміки містить важливу інформаційну складову про фізіологічної варіабельність процесів в організмі [2]. Використання методів нелінійної динаміки для аналізу частоти серцевих скорочень і артеріального тиску дозволяє отримати додаткову інформаційну складову та стимулює значну інноваційну динаміку досліджень серцево-судинної системи [3]. В останні десятиліття методи нелінійної динаміки, успішно використовуються для аналізу складних фізіологічних процесів в організмі. Однак вплив детермінованих нелінійних показників недостатньо вивчений на сьогоднішній момент. Фізіологічні дані мають значно складнішу структуру ніж вважалося, що пов'язано з впливом різноманітних дестабілізуючих впливів на організм людини, при чому ці впливи

мають як короткочасну так і довготривалу дії тому регуляційні процеси, що можуть бути визначені за варіабельністю серцевого ритму є важливим джерелом інформації про стабільність функціонування всього організму [5]. Складні фізіологічні сигнали хоча і часто, нестаціонарні, але вони вміщують в собі не випадкову складову, так складність може стати новим клінічним біомаркером для прогнозування порушення стабільності функціонування організму [6].

Аналіз варіабельності серцевого ритму на основі нелінійної фрактальної динаміки дозволив визначити ознаки нелінійної динаміки у людей схильних до високого ризику раптової серцевої смерті [7]. Було досліджено, що мінливість, що є основою інтервалів серцево-судинних скорочень не є випадковою [8]. Використання фазових портретів, зокрема карт Пуанкаре дозволило, спостерігати ознаки нелінійної динаміки частоти серцевих скорочень та наочно дослідити біомедичні сигнали [9]. Відкриття мультифрактальної природи динаміки ВСП показало, що модуляція серцевого ритму є навіть складнішою, ніж раніше вважалося, що характеристики потребують численних показників для аналізу багатовимірної складності та визначення доречності використання як якісних так і кількісних показників для оцінювання хаотичності пульсацій кардіосигналів.

Мета статті

Метою дослідження є аналіз біомедичних сигналів з використанням методів нелінійної динаміки для отримання додаткової корисної інформації про сталість функціонування організму та вдосконалення процесу кількісного оцінювання складності та хаотичності часових рядів за розрахунком вибіркової та наближеної ентропії. Провести візуалізацію даних та отримати результати розрахунків методами нелінійної динаміки з використанням програми MATLAB для зменшення інформаційної невизначеності за рахунок оцінювання динаміки серцевого ритму.

Виклад основного матеріалу дослідження

В роботі запропонований підхід при якому біомедичний сигнал представлений у вигляді часових рядів що описують зміну параметрів серцево-судинної системи в часі. В якості біомедичного сигналу обрана варіабельність серцевого ритму що представлена у вигляді довготривалих часових рядів здорових учасників дослідження. Для імпорту сигналу в MATLAB використана відкрита база біомедичних сигналів сайту Physionet.org [10]. Часові ряди сформовані з біомедичних сигналів хотлерівського моніторингу впродовж 24 годин для збереження інформації про біологічну добову мінливість. Файл склада-

ється з стовпця даних тривалості поточного R-R інтервалів у мілісекундах. Вхідні данні можуть бути використані як контрольна група для вивчення захворювань з прогресуючими змінами ВСП, вроджених вад серця тощо. Для усунення артефактів в роботі проведена фільтрація сигналу за допомогою функції `hampel`. Артефактами вважаються інтервали RR, тривалість яких перевищує середнє значення M більш ніж на два-три стандартні відхилення [10]. Фільтра Хампеля, застосовується до даних вхідного вектора X . Для кожного відліку X функція обчислює медіану вікна та середньоквадратичне відхилення (СКВ) кожного показання від медіани вікна, використовуючи абсолютне відхилення від медіани. Як

що відлік відрізняється від медіани більш ніж на СКВ, його замінюють медіаною. Якщо X є матрицею, тоді функція розглядає кожен стовпець матриці як незалежний потік даних. Очищення від артефактів було проведено в програмі MATLAB за програмним кодом:

```
k = 3; ns = 3.0;
[RR, j] = hampel(RR0, k, ns);
Na = length(find(double(j)>0)); % кількість видалених артефактів
table(k, ns, Na)
```

Результати очищення біомедичного сигналу у вигляді фільтрованого сигналу (без артефактів) і графіку видалених артефактів подані на рис. 1.

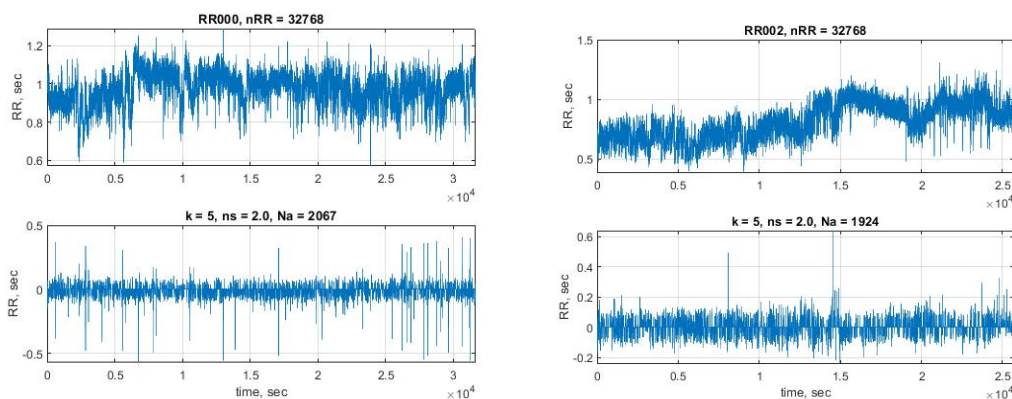


Рис. 1. Приклад фільтрації двох сигналів RR000 і RR002

Інтерполяцію, що передуює дослідженню нелінійних характеристик, було проведено за методом кубічної сплайн-інтерполяції. Наступним етапом обробки сигналу в даній роботі була побудова атрактора фазової траєкторії динамічної системи як одного з найпростіших і наочних способів оцінки її хаотичної поведінки. Цей метод використовується для статистичного та фрактального аналізу властивостей атракторів фазових траєкторій: якщо розглядати фазовий простір коливальної системи, то скінченна множина точок атрактора притягує фазові траєкторії. Так як атрактори можуть бути простими, регулярними, з постійною модою і з неперіодичними модами: для складних динамічних систем біологічної

природи атрактори наділені масштабною інваріантністю. У літературі їх називають «дивними» і їх критеріями є, у свою чергу, нестабільність траєкторії у вигляді експоненціального розбіжності від зони тяжіння та дробової розмірності [11].

Для таких складних динамічних систем, як живі організми, дивний атрактор можна побудувати з часового ряду однієї спостережуваної динамічної змінної. Відповідно до теореми Такенса [11], основні властивості атрактора будуть такими ж, як і у досліджуваного об'єкта, і його характеристики можна визначити за подібністю. Графіки атракторів досліджуваних сигналів ВСП наведені на рис. 2.

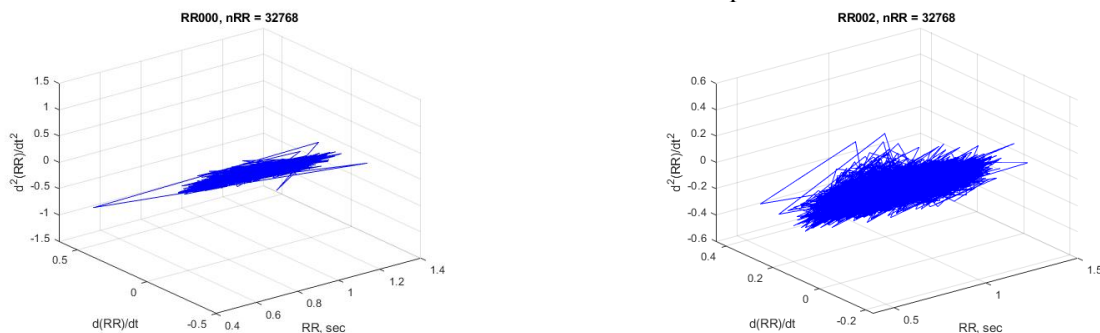


Рис. 2. Атрактор сигналів RR000 і RR002

Аналіз типу атракторів ВСП полягає в аналізі інтегральних процесів, заснованих на взаємодії між окремими компонентами ВСП або між цими компонентами та поєднаними характеристиками в інших органах і системах, що протікає як явище самоорганізації або синергії [12]. У загальному випадку фазовий простір є N -вимірним, однак для практичних випадків простір відображення можна вважати тривимірним, тобто $N = 3$.

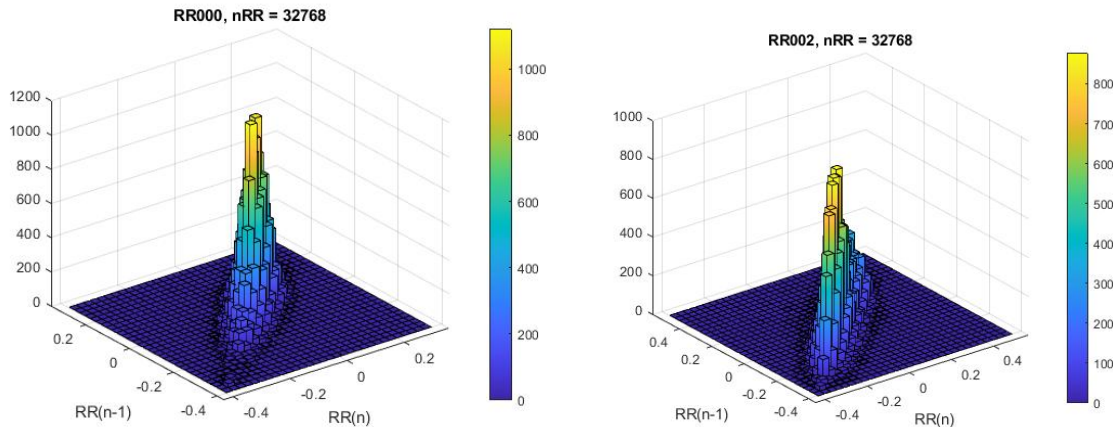


Рис. 3. Тривимірні гістограми сигналу RR000 та RR002

Для аналізу динаміки ВСП в роботі були побудовані карти Пуанкаре, які представляють біомедичний сигнал у просторі станів та дозволяють визначити нелінійні властивості за рахунок того, що графік Пуанкаре часового ряду представляє собою діаграму розсіювання змінної $X(n)$ відносно $X(n+1)$ або, що еквівалентно, $X(n-1)$ проти $X(n)$. Зазвичай регулярна «кометоподібна» форма графіка Пуанкаре часового ряду інтервалів RR показує статистичний зв'язок між послідовними точками даних, де даний інтервал RR, ймовірно, слідуватиме або передуватиме інтервалу подібної тривалості [9].

Насправді розкид точок даних у напрямку, перпендикулярному до діагоналі графіка Пуанкаре, є мірою локальної дисперсії часового ряду, що визначається як короткострокова мінливість біомедичної системи. Стандартний графік Пуанкаре

Таким чином атрактор сигналу ВСП є тривимірною візуалізацією змінної та її похідних 1-го та 2-го порядку. Така візуалізація дає чітке уявлення про динаміку процесу.

У ході роботи в тривимірному координатному просторі для візуалізації розташування пар послідовних RR інтервалів були побудовані тривимірні гістограми. Тривимірні гістограми для досліджуваних сигналів представлені на рис. 3.

долає одне обмеження гістограми, яке полягає в тому, що гістограма не представляє інформацію про кореляції між точками даних. В той час як стандартні чорно-білі карти Пуанкаре мають суттєві обмеження, що полягає у відсутності інформації про щільність точок даних в роботі включені відносні частоти пар послідовних точок даних у стандартний графік Пуанкаре, що дозволяє отримати двовимірні гістограми $RR(n)$, $RR(n+1)$ рис. 4. При такому підході формується сукупність точок з центром на бісектрисі. Причому відстань від початку координат до центру характеризує найбільш очікувану тривалість серцевого циклу, а відхилення точок від бісектриси показує на скільки n -й інтервал між послідовними R зубцями довший або коротший за $(n+1)$ -й інтервал.

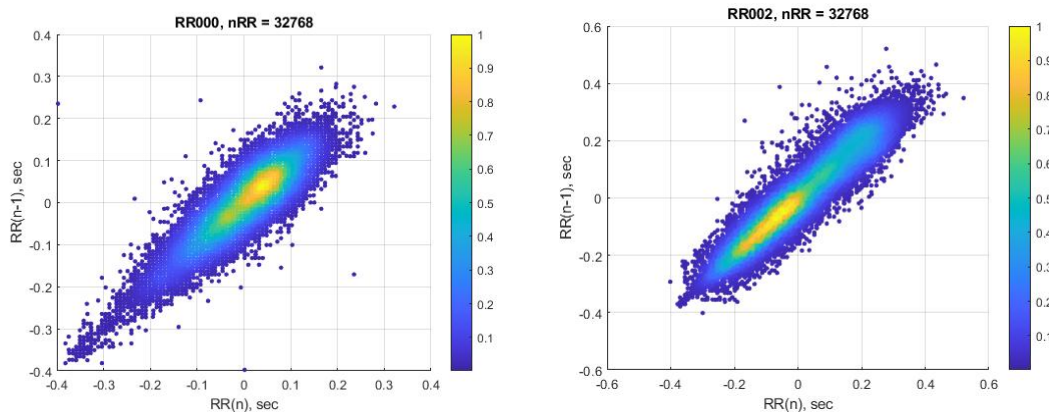


Рис. 4. Графік Пуанкаре для сигналів RR000 та RR002

Результати оцінювання методами нелінійної динаміки

У роботі також проведено дослідження сигналів ВСР методами нелінійної динаміки. Першим етапом цього дослідження є оцінка хаусдорфової розмірності. Перший крок у загальному визначенні розмірності атрактора полягає у введенні оцінок розмірності Хаусдорфа – розмірності підмножин у метричному просторі [12]. Якщо $N(\delta)$ – кількість комірок розміром δ , що покривають криву Хаусдорфова розмірність D дивного атрактора може бути обчислена як:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln(N(\delta))}{\ln(1/\delta)}.$$

Наступним етапом є оцінка старшого показника Ляпунова. Важливою характеристикою хаотичних пульсацій є показники Ляпунова, які визначають швидкість експоненціального зростання малих збурень (розбіжності двох початково близьких траєкторій атрактора). Оцінку ступеня хаотичності системи традиційно визначають за старшим показником Ляпунова [13]. Для цього розглядаються два стани системи, виміряні в початковий момент часу відстань між дорівнює:

$$|X_1(0) - X_2(0)| = \delta_0 \ll 1.$$

Відстань змінюється з часом t , тоді

$$\delta(t) = |X_1(t) - X_2(t)|,$$

а старший показник Ляпунова λ можна визначити за формулою:

$$\delta(t) = \delta_0 \exp(\lambda t).$$

У разі хаотичної поведінки старший показник Ляпунова завжди додатний ($\lambda > 0$). Крім того, за цим критерієм нескладно визначити ступінь неупорядкованості системи, тобто ступінь її хаотичності: чим вищий найвищий показник, тим глибший хаос. Прагнення позитивного показника Ляпунова до нуля означає зменшення хаосу в системі. Алгоритми оцінки старшого показника Ляпунова для однієї реалізації досліджуваного процесу базуються на тому, що з часом відстань між двома траєкторіями збільшується зі швидкістю, яка визначається λ . Якщо один відлік $x(t)$ від спостережуваної реалізації x , то усі зчитування цієї реалізації $x(i)$, для яких виконується умова $|x(t) - x(i)| < \epsilon$, вважаються початками ϵ -близьких траєкторій [13]. Відстань між даною та сусідніми траєкторіями через інтервал часу τ після початку порівняння визначається як:

$$dist(x(t), x(i), \tau) = |x(t + \tau) - x(i + \tau)|.$$

У зв'язку з коливанням відстані між сусідніми траєкторіями вздовж траєкторії, для отримання стійкої оцінки старшого показника Ляпунова необхідно усереднити відстань по всіх ϵ -сусідніх траєкторіях та по всіх відліках $x(t)$ досліджуваного часу серії, у зв'язку з чим:

$$S(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dist(x(t), x(i); \tau) \right).$$

Саме крутизна кривої $S(t)$ на лінійній ділянці визначає показник Ляпунова λ . Якщо старший показник Ляпунова $\lambda > 0$, то система є хаотичною. Хаотичність механізмів фізіологічної регуляції використовується для підвищення достовірності оцінки функціонального стану організму.

Наступним етапом оцінки біомедичного сигналу є оцінка ентропії за Колмогоровом, яка дозволяє здійснити оцінку швидкості втрати інформації про процеси, що відбуваються в біомедичній системі в часі. Ентропію Колмогорова часто називають сумою всіх позитивних показників Ляпунова [14]:

$$\langle \xi(\tau) \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(\tau).$$

Використання класичного методу нормованого розмаху (R/S -метод) для аналізу ВСР із застосуванням методу Херста полягає в обчислюється середнє значення $\{\xi(t)\}$ на інтервалі часу τ , що має ту ж розмірність, що і час t для наявного часового ряду $\xi(t)$. Для розрахунку залежності накопиченого відхилення $X(t, \tau)$ від інтервалу часу τ використана залежність:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^{\tau} \{ \xi(u) - \langle \xi(t) \rangle_\tau \}.$$

Для розрахунку абсолютної функції діапазону R , що відповідає накопиченому відхиленню використана формула:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau).$$

Діапазон залежить від довжини інтервалу і може збільшуватися з його збільшенням. Залежність безрозмірної функції R/S від довжини інтервалу часу τ отримується шляхом поділу R на стандартне відхилення S ряду $\xi(t)$:

$$s(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{u=1}^{\tau} \{ \xi(u) - \langle \xi(t) \rangle_\tau \}^2}.$$

За результатами дослідження багатьох природних процесів встановлено емпіричний зв'язок

між нормованим діапазоном R/S і довжиною інтервалу τ через показник H :

$$\frac{R}{S} = \left(\frac{\tau}{2}\right)^H,$$

де H може приймати значення від 0 до 1. Величина $H > 0,5$ характеризує збереження тенденції ряду до зростання або зменшення як у минулому, так і в майбутньому. Якщо $H < 0,5$, то це означає тенденцію ряду до зміни тренду: зростання змінюється зменшенням і навпаки. Останнім кроком є оцінка наближеної та вибіркової ентропії. Вибіркова ентропія (SampEn) є модифікацією наближеної ентропії (ApEn), яка використовується для оцінки складності фізіологічних часових рядів сигналів, діагностики хворобливих станів [15]. SampEn має дві переваги перед ApEn: незалежність від довжини даних і відносно без-

проблемна реалізація [16–18]. Описані вище етапи дозволили синтезувати процес обробки ВСР, зокрема, методами нелінійної динаміки. Запропонований підхід до оцінки варіабельності серцевого ритму на основі розрахунків його показників дозволяє визначити варіабельність Хаусдорфа, показники Ляпунова і Херста, ентропію Колмагорова, апроксимативну та вибіркову ентропії. Результати впровадження описаного підходу з використанням емпіричних даних представлені в табл. 2. Описаний підхід забезпечує покращену оцінку часових рядів і має бути корисним інструментом у дослідженнях динаміки серцево-судинних захворювань людини. Методи нелінійної динаміки оцінюють кілька параметрів, які сприяють розширеній діагностиці серцево-судинних захворювань.

Таблиця 2

Кількість видалених артефактів для деяких файлів

Файл сигналу	Розмірність Хаусдорфа	Старший показник Ляпунова	Ентропія Колмагорова	Показник Херста	Наближена ентропія ApEn	Вибіркова ентропія SaEn
RR000	1.9708	0.0008308	4.685	0.08492	1.203	0.99586
RR002	1.9693	7.6865e-05	5.0196	0.02608	1.075	0.83034
RR003	1.9727	0.0012	3.937	0.21964	0.909	0.68035

Підхід аналізу ВСР використовує нелінійні методи аналізу RR-інтервалів ЕКГ-сигналу та складається з наступних етапів: імпорт записаного сигналу RR-інтервалів у середовище MATLAB; очищення сигналу від артефактів; побудова атратора ВСР; оцінка вищого показника Ляпунова; оцінка ентропії Колмагорова; оцінка індексу Херста; побудова скаттерограми сигналу ВСР; формування діагностичного висновку. Аналіз даних таблиці дозволяє зробити висновок про високі значення ApEn і SaEn, що свідчить про високу нерегулярність біоритмів сигналу RR000 і може бути ознакою розвитку серцево-судинних захворювань. Також візуальний аналіз карти Пуанкре (рис. 4) доводить ознаки порушення стабільності роботи серцево-судинної системи за відсутністю хмари орієнтованих точок уздовж лінії тотожності та утворенням гострого кінця в лівому нижньому кінці графіка. У роботі описано етапи аналізу ВСР з використанням програми MATLAB для їх реалізації. При розробці методу використовувалися бази даних біомедичних сигналів із сайту Physionet.org.

Висновки

Складовою комплексного підходу з визначенням рівнем безпеки людини є своєчасна та надійна оцінка її функціонального стану. Застосування безпеки людини сприяє комплексній

реакції на багатовимірні причини та наслідки складних проблем. Для розробки методів своєчасної діагностики та прогнозування необхідним є поєднання традиційних методів вимірювання та обробки біомедичних сигналів у поєднанні з альтернативними методами, які можуть їх ефективно доповнювати за рахунок використання сучасних методів обробки сигналів у часовій та частотній областях. необхідно. У статті запропоновано використання методів нелінійної динаміки для аналізу варіабельності серцевого ритму, що дозволило по-новому зрозуміти зміни частоти серцевих скорочень при різних фізіологічних і патофізіологічних станах. Використання запропонованого підходу надає додаткову прогностичну інформацію та доповнює традиційний аналіз варіабельності серцевого ритму, оскільки саме зміна динаміки варіабельності серцевого ритму має прогностичне значення щодо прогресування захворювання та смертності. Зміни в динаміці ВСР мають прогностичне значення щодо прогресування захворювання (наприклад, ішемічної хвороби серця) і смертності (наприклад, після гострого інфаркту міокарда). І навпаки, показники ВСР обмежені в здатності розрізнити патофізіологічні стани або пацієнтів. Однак при застосуванні до окремого пацієнта протягом певного періоду часу ці показники можуть виявитися клінічно корисними, диференціюючи

прогресування захворювання. Крім того, вони можуть бути цінним доповненням до сучасних систем моніторингу пацієнтів. Таким чином, стратифікація ризику на основі варіабельності серцево-судинної системи може бути більш ефективною в подальших дослідженнях.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Ivanets O. B., Hnatiuk G. V., Archirei M. V. (2018). A method of assessing the adaptation capabilities of Antarctic winterers. *Bulletin of the Academy of Engineering of Ukraine*. No. 1, p. 135–139.
- [2] Thayer J. F., Sternberg E. Beyond heart rate variability: vagal regulation of allostatic systems. (2006). *Neuroendocrine and Immune Crosstalk*. Volume 1088, Issue 1. p. 361. DOI: 10.1196/annals.1366.014.
- [3] Goldberger A. L., Amaral L. A., Hausdorff J. M., Ivanov P. C., Peng C. K. & Stanley H. E. (2002). Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 19 (Suppl. 1), p. 2466–2472. DOI:10.1073/pnas.012579499.
- [4] Norris PR, Morris JA Jr, Ozdas A, Grogan EL, Williams AE. (2005). Heart rate variability predicts trauma patient outcome as early as 12 h: implications for military and civilian triage. *J Surg Res*. No. 129(1). p. 122–8. doi: 10.1016/j.jss.2005.04.024. Epub 2005 Jun 23. PMID: 15978622.
- [5] Francesco B, Maria Grazia B, Emanuele G, Valentina F, Sara C, Chiara F, Riccardo M, Francesco F. (2012). Linear and nonlinear heart rate variability indexes in clinical practice. *Comput Math Methods Med*. PMID: 22400047. p.:219080. DOI: 10.1155/2012/219080. PMCID: PMC3287009.
- [6] Norris P. R. S.M. Anderson, J. M. Jenkins, et al. (2008). Heart rate multiscale entropy at three hours predicts hospital mortality in 3,154 trauma patients. *Shock*. No. 30(1). p. 17–22. doi: 10.1097/SHK.0b013e318164e4d0. PMID: 18323736.
- [7] Irurzun, I. M., Garavaglia, L., Defeo, M. M., & Thomas Mailland, J. (2021). RR interval time series from healthy subjects (version 1.0.0). *PhysioNet*. DOI:10.13026/51yd-d219.
- [8] Henriques T., Ribeiro M., Teixeira A., Castro L., Antunes L., Costa-Santos C. (2020). Nonlinear Methods Most Applied to Heart-Rate Time Series: A Review. *Entropy*. № 22. p. 309. DOI:10.3390/e22030309.
- [9] Golińska A. K. (2013). Poincaré Plots in Analysis of Selected Biomedical Signals. *Studies In Logic, Grammar And Rhetoric*. № 35(48). p. 117–127. DOI: 10.2478/slgr-2013-0031.
- [10] Goldberger, A., Amaral, L., Glass, L., Hausdorff, J., Ivanov, P. C., Mark, R., Mietus, J. E., Moody, G.B., Peng, C.K. and Stanley, H.E. (2000). PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a new research resource for complex physiologic signals. *Circulation* [Online]. 101 (23), pp. e215–e220.
- [11] Takens, F. (1981). *Detecting strange attractors in turbulence*. In: Rand, D., Young, L.S. (eds) *Dynamical Systems and Turbulence*, Warwick 1980. *Lecture Notes in Mathematics*, vol 898. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI:10.1007/BFb0091924.
- [12] Falconer, Kenneth J. (2003). *Fractal geometry. Mathematical foundations and applications*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 336 p.
- [13] Strogatz, Steven (1994). *Nonlinear Dynamics and Chaos : with Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. Perseus Books. ISBN 978-0-201-54344-5
- [14] Grassberger, P. & Procaccia, I. (1983). Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal. *Phys. Rev. A* 28, 2591–2593. DOI:10.1103/PhysRevA.28.2591.
- [15] Richman, J. S. & Moorman, J. R. (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* № 278, H2039–H2049.
- [16] Xiong W., Faes L., Ivanov P.C. (2017). Entropy measures, entropy estimators, and their performance in quantifying complex dynamics: Effects of artifacts, nonstationarity, and long-range correlations. *Phys. Rev. E*. № 95. p. 062114. DOI: 10.1103/PhysRevE.95.062114.
- [17] Shchapov P. F. Ivanets O. B., Sevryukova O. S. (2020). Dynamic properties of the time series of results of biomedical measurements *Science-intensive technologies*. 46, № 2. p. 236–244. DOI: 10.18372 / 2310-5461.46.14811.
- [18] Eremenko V. S. Burichenko M. Yu., Ivanets O. B. (2020). Method of processing the results of measurements of medical indicators. *Science-intensive technologies*. 47, № 3. p. 392–398. DOI: 10.18372 / 2310-5461.47.

**Іванець О. Б., Буриченко М. Ю., Архирей М. В., Братко В. Ю.
ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ ДЛЯ ОБРОБКИ
БІОМЕДИЧНИХ ДАНИХ**

Застосування безпеки людини сприяє комплексній реакції на багатовимірні причини та наслідки складних проблем. Для розробки методів своєчасної діагностики та прогнозування захворювань серця в рамках проактивного підходу поряд з існуючими методами необхідно використовувати альтернативні методи, які доповнюють традиційний аналіз варіабельності серцевого ритму в часовій і частотній областях. Метою дослідження є аналіз біомедичних сигналів з використанням методів нелінійної динаміки для отримання додаткової корисної інформації про сталість функціонування організму та вдосконалення процесу кількісного оцінювання складності та хаотичності часових рядів за розрахунком вибіркової та наближеної ентропії. Проведено візуалізацію даних та отримано результати розрахунків методами нелінійної динаміки для зменшення інформаційної невизначеності за рахунок оцінювання динаміки серцевого ритму. Запропоновано використання методів нелінійної динаміки для аналізу варіабельності серцевого ритму, що дало нове уявлення про зміни серцевого ритму при різних фізіологічних і патофізіологічних станах. Використання запропонованих методів дає додаткову прогностичну інформацію та доповнює традиційний аналіз варіабельності серцевого ритму, оскільки саме зміна динаміки варіабельності серцевого ритму та частоти серцевих скорочень має прогностичне значення щодо прогресування захворювання (наприклад, ішемічної хвороби серця) та смертності (наприклад, після гострого інфаркту міокарда). І навпаки, індекси варіабельності серцевого ритму обмежені в здатності розрізняти патофізіологічні стани або пацієнтів. Однак при застосуванні до окремої людини протягом певного періоду часу показники можуть бути клінічно корисними, диференціюючи прогресування захворювання

Ключові слова: математична модель, діагностика, прогноз, методи нелінійної динаміки, безпека людини, варіабельність серцевого ритму.

**Ivanets O., Burichenko M., Arkhyrei M. Bratko V.
PECULIARITIES OF USING NONLINEAR DYNAMICS METHODS FOR BIOMEDICAL DATA
PROCESSING**

The application of human security facilitates a comprehensive response to the multidimensional causes and consequences of complex problems. To develop methods for timely diagnosis and prediction of heart diseases within the framework of a proactive approach, along with existing methods, it is necessary to use alternative methods that complement the traditional analysis of heart rate variability in the time and frequency domains. The purpose of the study is the analysis of biomedical signals using nonlinear dynamics methods to obtain additional useful information about the stability of the organism's functioning and to improve the process of quantitative assessment of the complexity and chaos of time series by calculating the sample and approximate entropy. Data visualization was carried out and the results of calculations using nonlinear dynamics methods were obtained to reduce information uncertainty due to the assessment of heart rate dynamics. The use of non-linear dynamics methods for the analysis of heart rate variability is proposed, which provided a new insight into heart rate changes in various physiological and pathophysiological conditions. The use of the proposed methods provides additional prognostic information and complements the traditional analysis of heart rate variability, since it is the change in the dynamics of heart rate variability and heart rate that has prognostic value regarding the progression of the disease (for example, ischemic heart disease) and mortality (for example, after an acute myocardial infarction). Conversely, indices of heart rate variability are limited in their ability to discriminate between pathophysiological conditions or patients. However, when applied to an individual person over a certain period of time, the indicators can be clinically useful, differentiating the progression of the disease

Keywords: mathematical model, diagnosis, prediction, nonlinear dynamics methods, human security, heart rate variability.

Стаття надійшла до редакції 15.11.2022 р.

Прийнято до друку 26.12.2022 р.