

УДК 53.072.11:612.172.2

Я.П. Драган, Б.І. Яворський, Є.Б. Яворська

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя,
кафедра біотехнічних систем

КОНЦЕПЦІЇ І ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЗНАЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РИТМІКИ КАРДІОСИГНАЛІВ

© Драган Я.П., Яворський Б.І., Яворська Є.Б., 2002

Наведено методологічні основи обробки електрокардіосигналу при визначенні метрологічних характеристик його ритміки.

Methodological foundations of the electrocardiosignal processing under determining of metrology characteristics of its rhythmic are given.

Ритміку електрокардіосигналу (ЕКС) вивчають та оцінюють за ритмокардіограмою (РКГ) — послідовністю значень інтервалів між R-хвилями попередньо обробленої електрокардіограми (ЕКГ), як правило, виміряних між моментами часу при амплітудах цих хвиль [1–3]. Попередня обробка ЕКГ є низькочастотною фільтрацією [4], характеристики якої не пов'язують з ритмікою ЕКС. Метрологічні характеристики ритміки (які можна поміряти і які у мінімальній кількості повно її представляють та є інваріантом до часу вимірів) визначають на базі математичної моделі РКГ. Використовуються два підходи до математичного моделювання РКГ: (а) як гістограми (графіку) послідовності значень RR-інтервалів; (б) як точкової (евентуальної) послідовності [5,6]. Ритміку оцінюють в одному випадку за спектр РКГ, а в іншому, — за моментними функціями.

Поняття ритміки (циклічності, періодичності) пов'язані з фундаментальним поняттям інваріантності до зсувів, трансляцій (у часові — стаціонарності) [7]. R-хвилі ЕКГ за характером є евентуальними, як правило, — нестационарними, їм не властива суворо періодичність і, загалом, стаціонарність. Тому використання за метрологічні характеристики ритміки ЕКС "власних" характеристик стаціонарних послідовностей (спектрів, моментів другого порядку), визначених з РКГ, вимагає належного пояснення, як і взагалі коректність використання для цього РКГ.

Обґрунтовуємо основні положення математичного моделювання евентуальних, нестационарних за природою кардіосигналів засобами теорії другого порядку (ЕТСС) [8] та пропонується принцип спеціальної підготовки [9] ЕКГ для цього.

Сучасний стан та напрям розвитку теорії ритміки при застосуваннях до ЕКС вимагає розуміння відповідних термінів та чіткого усвідомлення понять, які вони означають. Ще І. Кант зазначав [10]: "Усяке людське знання починається з інтуїції, потім переходить до понять і завершується ідеями". А за словами А. Пуанкаре [10]: "...треба побачити мету, а здатність, що навчає нас бачити, є інтуїція" (від лат. *intuitio* — уважно дивлюсь; означає здатність безпосереднього розпізнання істини, здогад, проникливість базовану на досвіді). І далі: "Логіка доводить, а інтуїція творить". Сформулюємо теоретичні (грец. *теорія* — розгляд, система знань добута шляхом логічних операцій або математичних розрахунків), базуючи на вихідних постулатах (лат. *postulation* — вимога), твердження, які, як узагальнення з досвіду необхідних (в нашому випадку послідовності тривалостей RR-

інтервалів) фактів, покладемо в основу добре розвинутої теорії (тут — спектрально-кореляційної), перетворюючи їх в її аксіоми (грец. *αξίωμα* — прийняте, за вихідне положення, тут: ергодичність, періодичність, ритмічність). Аксіоми означають (дефініюють, від лат. *definitio* — означити, головно, логічно), тобто цілковито зададуть відповідний логічний (і математичний) об'єкт (з метричним ізоморфізмом евентуальної послідовності значень часу при R-хвилях до спектра). Всю теорію ритміки кардіосигналів тоді становитимуть висновки з аксіом, а отже, і з постулатів, а всі твердження теорії логічно рівносильні їм. Забезпечує логічну рівносильність, базуючись на теоремах з їхніми необхідними і достатніми умовами (позначають *iff*, що є запровадженням П. Галмошем скороченням від *if and only if*), розгляд послідовностей значень RR-інтервалів як випадкового процесу. Проте "...всяка система знань, тобто теорія, ґрунтується на певних вихідних постулатах або аксіомах, які в рамках цієї системи не можуть бути доведені. Без постулативного базису неможливо побудувати ніяких умовиводів. Звичайно розвиток науки показує, що згодом вдається включити всю таку систему в ширшу, в якій її постулати будуть уже виводитися з більш загальних. Але від цього ситуація не змінюється, бо питання про постулативний базис теорії лише зміщується, переноситься далі, знову постає, але вже щодо системи постулатів, розширеної теорії. Теорія, її закони, не є узагальненням емпіричних (грец. *εμπειρία* — досвід) даних. Не існує однозначного шляху від сукупності емпіричних фактів до теоретичних постулатів. В кінці індуктивного процесу завжди маємо логічний стрибок" [10].

Викладене малося на увазі при усвідомленні проблеми означення та визначення метрологічних характеристик ритміки ЕКС за послідовністю RR-інтервалів ЕКГ і факт, що застосування для цього відомих, стандартних засобів та методів не завжди дають необхідну, адекватну інформацію — тобто має бути певна, міроозначна її обробка.

Емпіричне дослідження ритміки, чи, як ще кажуть, мірничий (або з наслідування, рос. *измерительный*, вимірювальний) експеримент (лат. *experimentum*, *experier* — випробовую), тобто спеціально організована спроба є складною науково-технічною проблемою [11]. Тому на перший план виводилася модель і не стільки самого досліджуваного об'єкта (серця) як сигналу (ЕКС), який несе відбиток часово-просторової структури (ритміки) у своїй структурі, у її характеристиках і параметрах. Таке розмежування — об'єкта і сигналу, та суттєву роль останнього, вперше чітко накреслили модерні напрямки фізики минулого ХХ століття, що ними є квантова теорія та теорія інваріантності (яку чомусь стали називати теорією відносності) [10]. Поняття сигналу закріпилося тоді ж і в біології — в термінах перша і друга сигнальні системи [12]. В наш час сформувався як підсумок здобутків різних галузей досліджень і людської діяльності таке його тлумачення: сигнал — це фізичний об'єкт (послідовність R-хвиль), що служить засобом перенесення відомостей про досліджуваний об'єкт (серце) у часі та просторі. Він мусить іти (надходити, поширюватись) від досліджуваного об'єкта до чутливого елемента — сенсора ("чуйника", чи, з рос. *датчика*, давача), фіксуватись ним та індукуватись (від лат. *indico* — вказую) найчастіше — візуалізуватись (лат. *visualis* — зоровий). Кардіосигнал виникає спонтанно (евентуально), внаслідок функціонування (лат. *functio* — виконання, дія) серця та стимульовано (лат. *stimulo* — збуджую, заохочую), як реакція (франц. *reaction* — дія-відповідь) на зовнішнє збудження, що часто трактують як зміну (модуляцію, від лат. *modulatio* — розмірність, гармонійність, ритм) характеристик збудника. Отже, ЕКГ не тільки фізичний процес. Зокрема для фізичних процесів, справедливий принцип рівності дії і протидії. Він логічно

необхідний. Проте це далеко від практики, бо приводить до уявлення, що отримання відомостей про стан серця нічим не "оплачується" і тому можна мірянням (про його алгоритм нічого не говориться, бо мірництво трактується як якийсь відірваний від фізики набір рецептів — метрологія, що є частиною техніки чи навіть вузької технології) цілковито визначити одночасно всі координати стану серця у фазовому просторі. Недостатність такого підходу і його недоліки проявились ще при переході фізики до вивчення явищ мікросвіту. Даний принцип є виразом у дещо спрощеному вигляді третього закону Ньютона, коли при цьому забувають про другий, що сила при дії на матеріальну точку зумовлює певну їй зміну кількості руху, мірою якої є похідна від кількості руху — добуток маси на швидкість^{*)}. Тому, коли загалом взаємодійні тіла є різних вагових категорій (зокрема різних мас), то ефект взаємодії для них буде різний. Такими є, наприклад, Сонце, Земля та інші планети. Тому під дією гравітації (взаємодії за рахунок різних мас) планети і кружляють навколо Сонця.

Спектральна модель, адекватна задачі вимірювання метрологічних характеристик ритміки, є об'єкт, бачений крізь призму цієї задачі. Модель ефективніша — зручніша чи простіша, ніж ЕКС, безпосередньо надається для цього. З цим підкреслимо її дискримінаційність: вона узагальнює винятково суттєві для задачі аспекти ритміки. Формально: модель — це зіставлений з досліджуванним реальним об'єктом об'єкт іншої природи, який, з погляду розв'язуваних задач, має просторово-часову структуру, ідентичну (часом говорять — ізоморфну, але, строго кажучи, реальний об'єкт не може бути ізоморфним із його моделлю) зі структурою досліджуваного об'єкта. В теорії моделей таку ідентичність називають подібністю. Подібні об'єкти мають необхідно однакові математичні моделі — математичний об'єкт у повному сенсі цього слова, означений коректно згідно з канонами математики. Математична модель ритміки є об'єктом, подібним до випадкової послідовності. Математика дає засоби дискримінації як логічно строга мова — формалізує врахування постульованих як аксіоми закономірностей ритміки і, водночас, автоматизує логічний процес умовиводів із цих постулатів. Це, власне, веде до створення відповідної теорії ритміки як системи знань стосовно заданого класу задач про серце і як підстави розроблення інженерних засобів побудови, розрахунків, впровадження у практику результатів дослідження РКГ. Теорію становить сукупність, поєднання умовиводів з постулатами. Власне, формування постулатів і є математичним моделюванням, становить його суть, бо модель, як математичний об'єкт, має означувати в сенсі математичної дефініції, а її існування стверджує несуперечливість постулатів. Висновки ж, в силу статусу моделі як математичної, логічно рівносильні їм. При цьому одразу виокремлюється з двох класів моделей (1) — "прозорих", характерних для детерміністських, планованих, проєктованих і розрахованих інженерних складних систем і (2) — типу "чорної скриньки", що бере початок від зародження кібернетики, клас (2) моделі ритміки. Але спільною рисою в обох випадках є базування досліджень на сигнальній концепції, тобто на підкресленні ролі, що її відіграють при цьому сигнали як матеріальні носії і переносники відомостей про

*) Власне цим Ньютон розкрив "таємницю" руху [10], "угадавши" ті фазові змінні, що беруть участь у формулюванні закону і першим зрозумів та сформулював закон збереження імпульсу, за яким лежало геніальне відкриття, що сила визначає зміну швидкості, а не саму швидкість, тобто зміну координат. Силу визначає не швидкість, а прискорення — зміна зміни координати.

досліджуваний об'єкт як складну багатофакторну систему і врахуванні способів відображення цих відомостей сигналами. Подальша дискримінація (сегрегація) типів моделей базуватиметься на виокремленні (і сформулюванні як постулати) загальних властивостей спільних для певних множин (сукупностей) систем. Зокрема, таку сукупність творять складні еко-біо-технічні системи, сепарація яких має взяти під увагу такі найважливіші, притаманні їм усім, властивості: 1) системність — система є щось якісно нове, більше ніж сукупність (чи проста сума як твердив ще відомий грецький філософ Платон ^{*)}) її частин (компонент), її поведінка не впливає з їхньої поведінки (кожної з особин), а визначається їхньою природою та характером взаємодії; 2) самоорганізація — породження у менше впорядкованому субстраті нових складних структур вищої впорядкованості з цільним та порівняно стійким режимом.

У мікросвіті, а також у складних системах, фігурують об'єкти однакових категорій, тому взаємодія, зокрема мірювання, суттєво впливає на стан об'єкта. Нечітке усвідомлення цього факту фізиками спричинило спершу несприйняття квантової теорії, а потім тривалий час дискусії про основні її принципи.

Кібернетика, теорія інформації (а фактично – теорія сигналів) наголосили як раз на "платі" за відомості, що посприяло коректності розуміння отримання відомостей про досліджувані об'єкти та роль сигналу в ньому і того, що він — не просто фізичний об'єкта, а такий, що несе (у своїй структурі) відбиток часово-просторової структури об'єкта, який є результатом фізичної взаємодії, але трактованої під кутом зору відображення досліджуваного об'єкта в ньому.

Дещо інакше, тобто з підкресленням іншого аспекту (навертаючись до генезису та етимології терміну: нім. *signal*, від лат. *signum*), його розуміють у теорії керування — як засіб передавання команд на виконання певних дій у системі. І цей аспект якраз ближчий до розуміння сигнальної системи в біології.

У вільному трактуванні мотивуватимемо потребу моделі так (див. передмову до збірника [13]): "На практиці виявляється, що самих тільки математичних пізнань далеко не досить для розв'язання тої чи іншої прикладної задачі – необхідно ще набути навички перекладі початкового формування задачі математичною мовою. Власне в цьому і полягає проблема опанування мистецтвом математичного моделювання, міркуваннями про підходи до опису й аналізу реальної проблеми, про можливість її математичної ідеалізації, вибір шляху побудови моделі ступеня приватності і відповідальності об'єктові, методи перевіряння (краще б — справдження) моделі. Цей найсуттєвіший і творчий етап праці сучасного фахівця звичайно залишається "поза кадром" у традиційних посібниках, що тяжіють до аксіоматичного, закінченого викладу відповідних дисциплін." У першій статті цього збірника підкреслено, що переклад так званого "реального світу" мовою математики дає змогу отримати точніше уявлення про його найсуттєвіші властивості і у певному сенсі передбачати майбутні події. Інші аспекти моделей як математичних об'єктів (індукція, дедукція, верифікація, адекватність) розглянуто у багатьох працях (наприклад, [13–15]).

^{*)} На відміну від редукціонізму — зведення дослідження складних систем до підходів вузьких фахових дисциплін (теорії акустики, теорії коливань і т.п.), інший напрямок — інтегралізм, полягає у розгляді кількох систем, рівень організації яких узгоджений із характером досліджуваних функцій. Формулювання ідей цього напрямку приписують Платонові, який вважав, що "ціле є щось більше, ніж проста сума його частин".

Зокрема, у праці [15]: "Модель — це такий матеріальний чи уявлений думкою об'єкт, який під час пізнання (вивчення) заступає об'єкт-оригінал, зберігаючи певні важливі для даного дослідження типові його властивості". Цим розділено фізичні та ідеальні [10] моделі, серед яких найважливішими є математичні, але про це там не сказано, так само як і про факт, що "типові властивості" колись (при певній задачі) важливі, а колись — ні.

Означення математичної моделі ритміки сформулюємо як у [8]: це математичний об'єкт, виражений у конструктивній формі, яка відкриває можливість пристосувати відомий або ж розробити новий відповідно узгоджений математичний апарат аналізу суттєвий в даний час на даному етапі розвитку науки з погляду означення метрологічних характеристик ритміки серця (див. також [7]).

Сенс математичного моделювання у нашому випадку — звести дослідження реального, "нематематичного" об'єкта (евентуальної послідовності R-хвиль) до розв'язання математичної задачі (дослідження її властивостей як випадкової послідовності), відкриваючи zarazом можливість використання для цього дослідження добре розвинутого математичного апарату (ЕТСС), спеціально розробленого для таких задач, поєднуючи його з потужною сучасною обчислювальною технікою.

Вихідним при побудові моделі є наявність послідовності R-хвиль, що висуває задачу отримання послідовності відліків часу. Але у таких практичних, прикладних задачах на відміну від задач математичних, не завжди буває від самого початку зрозуміло, що "нам дане" і що саме "потрібно довести". Розв'язання даної задачі розпочинається відбиранням відомостей (з ЕКГ). За тим проводиться виділення з ЕКГ R-хвиль та формування послідовності значень часу з подальшим їх опрацюванням (фактично, створення математичної моделі у вигляді випадкової послідовності).

Наявність послідовності R-хвиль, їх повторюваність, необхідна інваріантність до зсувів, трансляцій (у часові) їх характеристик приводить до такого означення випадкової послідовності

$$\xi(i\Theta) = t_i - i\Theta, \quad (1)$$

де Θ — період, ритм, t_i — значення часу при i -й хвилі, $i = 1, 2, 3, \dots$. Час t_i визначається при амплітуді оптимально обробленої R-хвилі. Ритм Θ , характеристика обробки визначаються за критерієм [16]

$$\arg \min_{\Theta \in T, h \in H} \text{VAR}_d f(h, \Theta),$$

де $T \subset \mathbb{R}$ — множина значень ритму, $H \subset \mathbb{H}$ — множина значень функцій Гільбертового простору, f — спектральна функція, VAR_d — d -варіація [7,8] функції. При оцінюванні спектральних функцій необхідно використовується попередня обробка (1) [9]. Ефективність метрологічних характеристик ритміки визначається за критеріями вибору базисів [8,17] представлення (1).

Отже, формалізуючи евентуальну послідовність R-хвиль, що характеризують роботу серця, дискриміновано відомості з виділенням суттєвих з погляду ритміки і пов'язано їх із відповідними поняттями, символами і математичними співвідношеннями ЕТСС.

1. Sayers B. Mc.A. *Analysis of heart rate variability* // *Ergonomics*. — 1973. — № 16. — P. 17-22. 2. Grauer K., Curry R. Whitney Jr. *Clinical electro-cardiography. A primary care approach*. — *Medical Economical Books: Oradel, New Jersi*, 1987. — 544 p. 3. Mironova T.,

- Mironov V. *Analysis of pauses between biosignals as a new methodology.—Analysis of biomedical signals and images.— Proceedings of 13-th biennial international conference BIOSIGNAL-96.— Brno: Technical University Brno Press, 1996.— P. 140–141.*
4. Электrokардиограф ЭКІК. Техническое описание и инструкция по эксплуатации тЕ2.893.141 ТО.— Львов: Редакционно-издательский отдел облполиграфиздата, 1990.— 80 с.
5. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. *Теория случайных процессов и ее инженерные приложения.* — М.: Наука.— 1991.— 384 с.
6. Baselli G., Civardi S. *A signal processing approach to the analysis of event series in biomedical applications/ Digital Biosignal Processing.— Amsterdam: ELSEVIER, 1991.— P. 181–211.*
7. Драган Я., Сікора Л., Яворський Б. *Основи сучасної теорії сигналів: Енергетична концепція, математичний апарат, фізичне тлумачення.— Львів: Центр стратегічних досліджень ЕБТЕС, 1999.— 133 с.*
8. Драган Я. *Енергетична теорія лінійних моделей стохастичних сигналів.— Львів: Центр стратегічних досліджень еко-біотехнічних систем, 1997.— 349 с.*
9. Iavors'kyi B.I. *A new approach to preliminary processing of random signals/ Analysis of biomedical signals and images.— Brno: Technical University Brno Press, 1996.— P. 134–136.*
10. Карнап Р. *Философские основания физики.— М.: Прогресс, 1991.*
11. Калантар В.А. *Многоплановый анализ биологических процессов// Теоретические и прикладные аспекты анализа временной организации биосистем.* — 1976.—С. 55–72.
12. Rashevsky N. *Mathematical Biophysics. Physico-mathematical Foundation of Biology // Dover Publication, INC: New York, 1960. — 462 p. — Vol. 1.*
13. *Математическое моделирование /* Ред. Дж. Эндрюс, Р. Мак-Лаун.— М.: Мир. 1979.—248 с.
14. Кемени Дж., Снелл Дж. *Кибернетическое моделирование (некоторые приложения).— М.: Сов.радио, 1972.— 192 с.*
15. Яглом И.М. *Математические структуры и математические моделирование.— М.: Сов. радио, 1980.— 144 с.*
16. Драган Я.П., Крива Н.Р., Яворський Б.І. *Проблема апостеріорного визначення темпу ритміки// Вісн. Тернопільського державного технічного університету.* - 1997. - Т.2. - № 1. - С. 115–125.
17. Шадріна Г.М., Яворський Б.І. *Критерії вибору базисів зображення випадкових процесів для ергатичних систем // Вісн. Тернопільського приладобудівного інституту.* - 1996. - № 2. - С. 133–137.