

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОПРАЦЮВАННЯ ФОНОКАРДІОСИГНАЛУ ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЙОГО У ВИГЛЯДІ ПЕРІОДИЧНО КОРЕЛЬОВАНОГО ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ

Спираючись на статистичні дані Всесвітньої організації охорони здоров'я та Міністерства охорони здоров'я України видно, що відбувається зростання захворюваності серцево-судинними недугами, тож виникає необхідність в удосконаленні існуючих систем автоматизованої діагностики, що є пріоритетним напрямком сучасної кардіології. Дослідження фазової структури серцевого циклу дає змогу об'єктивно оцінити стан серцево-судинної системи та виявляти порушення в її роботі на ранніх стадіях розвитку патологічного процесу. Базуючись на результатах медичних досліджень описано ключову роль синусового вузла як водія ритму скорочення серця та обґрунтовано засоби його математичної формалізації. Обґрунтовано застосування математичної моделі у вигляді періодично корельованого випадкового процесу для опрацювання фонокардіосигналу для оперативного та своєчасного виявлення порушень в роботі серця шляхом впровадження нового класу інформативно-інваріантних ознак.

Ключові слова: функціональний стан, серцево-судинна система, система автоматизованої діагностики, електрокардіографія, фонокардіографія, періодично корельований випадковий процес.

YURI PALANIZA

Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University

MODERN APPROACHES TO PHONOCARDIOSIGNAL PROCESSING AND ITS MATHEMATICAL MODEL AS A PERIODICALLY CORRELATED RANDOM PROCESS

Abstract – According to World Health Organization and Ministry of Health of Ukraine statistical data, the number of cardiovascular diseases in Ukraine and abroad, prompts to the development and improvement of the diagnosis of heart disease. Therefore the cardiovascular system state diagnostic is priority of a modern cardiology. By studying the phase structure of heartbeat cycles is real possibility to the cardiovascular system evaluation. Based on the number of medical facts about the cardiovascular system structure and functioning, considering the key role of sinus node as heart rhythmic activity driver, a mathematical formalization of it research is grounded. The main criteria of the phonocardiogram diagnostic systems based on its mathematical model in the form of a periodically correlated random process is described.

Keywords: functional state, cardiovascular system, automated system diagnostics, electrocardiography, phonocardiography, periodically correlated random process.

Постановка задачі

За даними Міністерства охорони здоров'я України (МОЗУ) та Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) спостерігається тенденція до зростання рівня смертності від захворювань серцево-судинної системи (ССС) людини. При цьому поширеність хвороб системи кровообігу серед працездатного населення становила 52 %, у тому числі ішемічної хвороби серця – 42,1 %, гіпертонічної хвороби (усі форми) – 61,5 % та судинно-мозкових захворювань – 30 % [1...3]. Тому важливим завданням сучасної медицини є завчасне виявлення патологічних змін в роботі ССС.

На сьогодні діагностика стану ССС ґрунтується на застосуванні методів фізіологічних досліджень, які базуються на проявах і властивостях ССС [4]. При цьому, стан ССС характеризується роботою різних її структур. Функціонування кожної окремо взятої структури супроводжується протіканням або зміною в часі параметрів чи характеристик певних фізичних процесів (зміна електричного поля, виділення тепла або зміна теплопровідності, зміна пружних властивостей середовища) [4]. Протікання цих змін в часі трактуються відповідно до основних положень системно-сигнальної концепції [5] як «сигнал». Кожен з отримуваних видів сигналів (потенціали, механічні коливання, звук та ін.) несе найбільше відомостей про стан характерної притаманної йому структури ССС. При цьому, роботу структур серця (наприклад міокарду, клапанів) найповніше характеризують акустичні сигнали, дослідження яких проводять за допомогою аускультатії, тобто звичайного прослуховування. При такому методі виявлення патології результат залежить від професійності лікаря, роздільної здатності його вуха та інших суб'єктивних факторів [4]. Перспективним при діагностуванні стану ССС є метод фонокардіографії [4,5], що ґрунтується на реєстрації акустичних показників механічної роботи серця (фонокардіосигналу). Структури ССС (клапани серця, крупні судини, потік крові, а також м'язи) породжують комплекс механічних коливань. На відміну від аускультатії [6], метод дає змогу більш об'єктивно отримати дані про механічну роботу серця, уможливило спостереження за динамікою зміни стану ССС у зв'язку з протіканням патологічних процесів, терапії таких процесів.

Аналіз досліджень та публікацій

Завдяки розвитку технологій та, зокрема, обчислювальної техніки, метод фонокардіографії здобув поширення в системах автоматизованої комп'ютерної діагностики, які вимагають застосування й постійного вдосконалення математичного апарату та алгоритмів, врахування нових факторів, що чинять вплив на здоров'я людини. Алгоритми роботи таких діагностичних систем визначаються математичною моделлю ФКС. Відомі математичні моделі можна умовно розділити на детерміновані (Кебот і Додж (1925),

Мангеймер (1941), Г. І. Касирським (1957)) та стохастичні [6...10]. Варто зазначити, що в таких діагностичних системах як СФЕРА-4 (НТЦ "ХАІ-МЕДИКА, Харків), "Кардіо +" („МЕТЕСОЛ", Чернігів), МКМ-08 (СФУ, Красноярськ, Росія) опрацювання даних базується на поданні ФКС як стаціонарної випадкової послідовності. При цьому проводиться оцінювання імовірнісних характеристик ФКС, а за математичну модель приймається стаціонарний випадковий процес. Такий підхід є спрощеним, не відповідає природі процесу серцевих скорочень [11,12] і не має засобів оцінювання статистичної взаємопов'язаності між різними циклами однієї і тієї ж серії спостережень, а також властивості ФКС повторюваності та випадковості, і не може бути використаний для своєчасного виявлення проявів захворювання.

Розширити можливості автоматизованих систем комп'ютерної діагностики дала праця Осухівської Г.М. [9], де в термінах енергетичної теорії стохастичних сигналів (ЕТСС) [5], обґрунтовано можливість використання періодично корельованого випадкового процесу (у вигляді сигналу релаксаційного мультипульсатора) як моделі для опису й аналізу тонового сигналу серця людини. Однак така математична модель як теоретичний концепт не в змозі адекватно описати серцеву діяльність, оскільки не враховує вплив нервової регуляції серцевих скорочень, а лише розглядає роботу серця як процес, що повторюється в деяких межах через приблизно рівні проміжки часу. результатів.

Відомі та поширені в медицині пристрої виявлення захворювань ССС, як, наприклад «Monitor-One» фірми Q-Med (США) для вирішення поставленого завдання використовують алгоритми опрацювання ЕКС, які ґрунтуються на аналізі його часової структури [1,3]. Опрацювання ЕКС проводиться на окремих сегментах (оскільки за виникненням і зростанням характерних ознак саме на окремих сегментах визначається наявність або відсутність патологічних змін) і лише в характерних точках. Інформація, що зосереджена в інших точках сегмента фактично ігнорується [2]. Рішення про наявність або відсутність патологічних змін приймається за результатами спостереження сигналу окремо взятого кардіокомплексу або сигналу, усередненого на короткому інтервалі часу [2]. Однак епізод прояву патології може розвиватися протягом кількох десятків секунд. Тому значна частина інформації не тільки про наявність епізоду а і про його перебіг (за умови наявності) в процесі опрацювання практично втрачається [2].

Формування цілей

Метою статті є обґрунтування математичної моделі ФКС, яка давала б можливість враховувати в структурі такого класу сигналів вплив нервової регуляції серцевих скорочень та була б придатною для задач діагностики шляхом впровадження нового класу інформативних ознак, що є індикаторами змін у функціонуванні окремих структур ССС.

Обґрунтування математичної моделі ФКС

В працях [13, 14] розкрито вплив нейрорегуляції на серцевий ритм, як основного чинника. На рис. 1 зображено провідну систему серця (зліва) та форму потенціалів дії різних відділів серця (справа). Ця система включає в себе сино-атріальний (синусів) вузол, атріо-вентрикулярний вузол, пучок Гіса (His W), ніжки пучка Гіса, волокна Пуркінє (Purkinje JP), пучки Самойлова-Венкебаха. У цій системі головним водієм ритму є синусів вузол (Й. Шмидт-Фойгт (1966)), який генерує збудження (Keitz A, Flack MW, Aschoff KA, Tawara S, Harrison DC, Schroeder JS, Berke OK Graham AF. Rider AK, Stinson EB), що, в свою чергу, поширюється по структурах провідної системи, спричиняючи послідовне скорочення ділянок міокарда та, відповідно, їх послідовне розслаблення (систола/діастола).

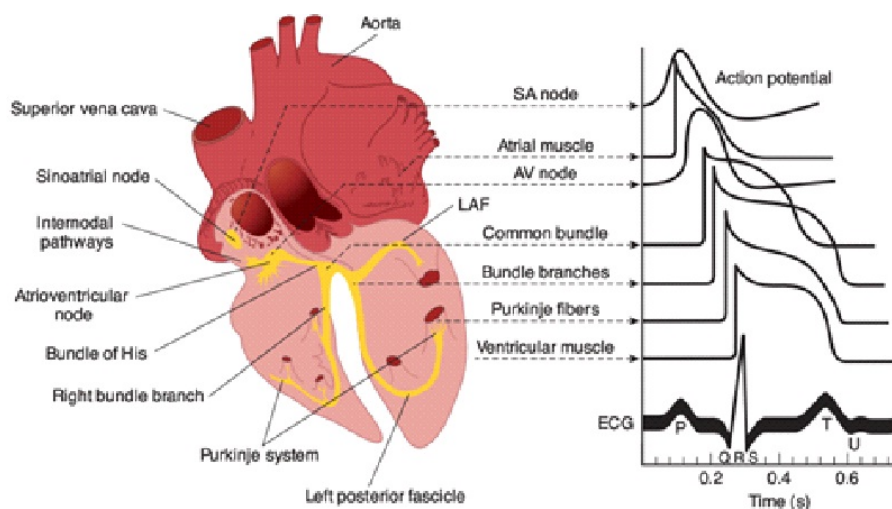


Рис. 1. Схематичне зображення провідної системи серця [14]

Таким чином всі етапи серцевого циклу (рис.1, рис. 2) – це послідовність електричних та механічних явищ у відповідь на подразник, що задається серцевим ритмом. Частота серцевих скорочень (ЧСС) визначається автоматизмом синусового вузла (тобто його спонтанною діастолічною деполяризацією), який модулюється [15] впливом вегетативних, гуморальних і місцевих факторів.

Отже, роботу серця можна описати «модуляцією» – кожен з послідовності імпульсів потенціалу дії спричиняє відповідь у вигляді серії послідовних рознесених в часі серцевих скорочень/розслаблень, при цьому форма, тривалість і фазові зсуви цих імпульсів можуть змінюватися в залежності від ступеня навантаження, емоційного стану та цілого комплексу інших екзогенних та ендогенних впливів. Відгуки також не будуть мати постійних параметрів, які, в свою чергу, будуть залежати від таких факторів, як, зокрема, стан провідної системи (блокада ніжки пучка Гіса), опору структур потоку крові (пролапси, стенози, аневризми), постінфарктних рубців, що має велику діагностичну цінність.

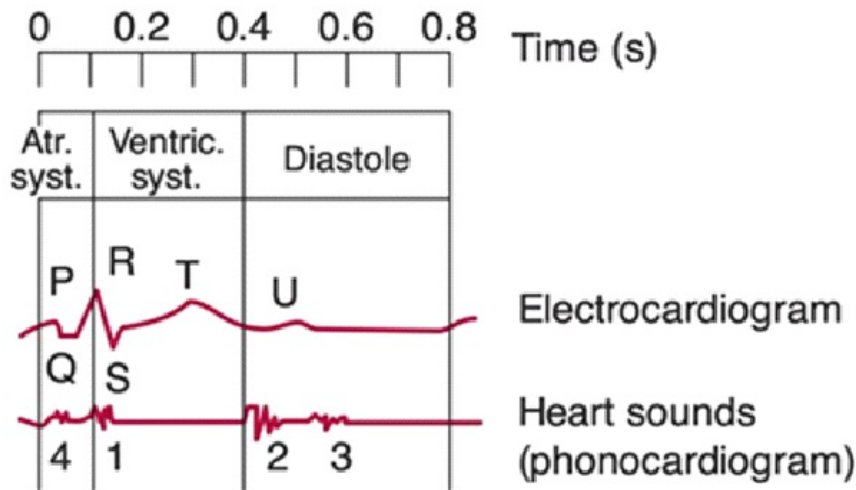


Рис. 2. Фази серцевого циклу (ЧСС 75 ударів за хвилину) [14]

Математична модель ФКС, як формальне відображення досліджуваного об'єкту, повинна враховувати у своїй структурі наведені вище нюанси. Як наслідок, адекватним ФКС математичним підходом, виходячи з фізичної природи породження такого класу сигналів засобами ЕТСС розробленої Я.П. Драганом, є модель у вигляді імпульсного періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП) класу π^T (процеси зі скінченною за період корельованості середньою потужністю), що зображується у вигляді:

$$\xi(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \xi_k(t) \cdot e^{ik \frac{2\pi}{T} t}, t \in \mathbf{R}, \quad (1)$$

де $\xi_k(t)$ – модуляційні компоненти фонокардіосигналу як стохастична складова сигналу; $e^{ik \frac{2\pi}{T} t}$ – періодична складова коливання із періодом коливань T , що називається періодом корельованості сигналу.

Виходячи з задач теорії сигналів К. Джордан розглянув фактично частковий випадок ПКВП за умови $\int_0^T \int_0^R |r(t+u, t)|^2 dt du < \infty$ і з використанням теореми Карунена-Лоева дав подання такого процесу через трансляційні компоненти, тобто послідовності імпульсів у вигляді власних функцій його кореляційної функції як ядра на відрізку $[0, T)$ та зсуви їх на відстані $jT, j \in \mathbf{Z}$ промодульовані амплітудно стаціонарною випадковою послідовністю (див. [16]) вигляду:

$$\xi(t) = \sum_{p \in \mathbf{Z}} \sum_{k \in \mathbf{N}} \eta_k^p \phi_k^p(t - pT), \quad (2)$$

Цей результат узагальнений у праці [17] за слабших умов скінченності потужності ПКВП, тобто середньої за період корельованості енергії процесу, а отже застосування енергетичної теорії і цим показано, що таке подання в даному разі рівносильне поданню через модуляційні компоненти. А цим обґрунтована застосовність до ПКВП всіх відповідних факторів цієї теорії (див. [5]). Деякі додаткові відомості стосовно цього питання наведені у публікації [18].

Таким чином серцева діяльність подається як залежність зміни процесу, що являє собою детерміновану імпульсну послідовність, промодульовану відповідно стаціонарною послідовністю. Такий процес прийнято називати трансляційною моделлю, беручи до уваги, що імпульсна послідовність отримується зсувами того самого імпульсу.

Модель у вигляді ПКВП є адекватним зображенням серцевої діяльності [19, 20]. Такі процеси успішно використані в багатьох працях як математичні моделі стохастичних коливань, бо обґрунтовують методи статистичного оцінювання за поодинокими реалізаціями імовірнісних характеристик процесів, а, таким чином і досліджуваних об'єктів – у даному разі функціонування ССС.

Висновки

Розглянута математична модель ФКС дасть змогу врахувати роль "водія" ритму (зокрема синусового вузла) у механізмі породження акустичної активності серця, виділити клас нових інформативно-

інваріантних ознак та на основі них побудувати метод опрацювання фонокардіосигналу для оперативного й своєчасного виявлення змін на ранніх етапах розвитку ІХС. Використання запропонованої моделі ФКС значно розширить можливості сучасних систем діагностики стану ССС людини.

Література

1. Коваленко В.М. и др. Смертність та інвалідність населення внаслідок серцево судинних та судинно мозкових захворювань—проблема сучасності / Коваленко В.М. // Укр. кардіол. журн. – 2003. – Т. 6. – С. 9–11.
2. Заклади охорони здоров'я та захворюваність населення України у 2001 році : статистичний бюлетень / Держкомстат України. – К., 2002. – 45 с.
3. Корнацький В. М. Проблеми здоров'я та подовження тривалості життя населення України / В. М. Корнацький // Укр. мед. часопис. – 2008. – №. 5. – С. 83–87.
4. Мустецов Н.П. Инструментальные методы медико-биологических исследований / Н.П. Мустецов. – Харьков : ХТУРЭ, 1999. – 176 с.
5. Драган Я.П. Энергетична теорія лінійних моделей стохастичних сигналів / Я.П. Драган. – Львів : Центр стратегічних досліджень еко-біо-технічних систем, 1997. – XVI, 333 с.
6. Аускультация сердца / [Алмазов В.А., Салимьянова А.Г., Шляхто Е.В., Клаусс Г.]. – СПб : СПбГМУ, 1996. – 232 с.
7. Бабак В.П. Обработка сигналов: підручник / В.П.Бабак, В.С. Хандецький, Е.Шрюфер. – К. : Либідь, 1996. – 392 с.
8. Федотов А.А. Математическое моделирование и анализ погрешностей измерительных преобразователей биомедицинских сигналов / А.А. Федотов, С.А. Акулов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 282 с.
9. Осухівська Г. М. Математична модель тонового сигналу для діагностики стану клапанів серця людини : автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук : 01.05.02 / Г.М. Осухівська. – Тернопіль, 1999. – 20 с.
10. ХАИ-МЕДИКА – оборудование для функциональной диагностики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://xai-medica.com/articles.htm>, вільний – Гол. з екрану. – Мова рос., англ.
11. Барабанов С.В. Физиология сердца / С.В. Барабанов. – СПб : Спецлит, 2001. – 143 с.
12. Anderson R.N., Becker A E. Cardiac anatomy: An integrated text a colour atlas. London, Gower, 1980.
13. Карпман В.Л. Фазовый анализ сердечной деятельности / В.Л. Карпман. – М., 1985. – 230 с.
14. Ganong W. F. Review of medical physiology, 24th Edition. – New York: McGraw-Hill Medical, 2010.
15. Морган-мл. Дж. Клиническая анестезиология / Дж. Э.Морган-мл. Мэгид С. Михаил / Книга вторая ; [пер. с англ. / под ред. акад. РАМН А.А. Бунятына]. – Москва : Изд. «Бином» ; Санкт-Петербург : «Невский диалект», 2000. – 365 с.
16. Gardner W. Franks L.E. Characterization of cyclostationary signal processes // IEEE Trans. on inf. th. 1975, v 21, № 1. – P. 6–14.
17. Драган Я.П. Трансляционные представления периодически коррелированных случайных процессов конечной средней мощности / Я.П. Драган // Тез. докл. 2-й Межотрасл. акуст. семинара "Модели, алгоритмы принятия решений". – М. : Изд. Акуст. ин-та им. Н.Н. Андреева АН СССР, 1988. – С. 7.
18. Драган Я. Линейные случайные процессы конечной энергии и классификация стохастических сигналов / Драган Я., Сикора Л., Яворский Б. // Pattern recognition and information processing. Proc. of Forth Intern. Conf. PRIP'97, Minsk, 20-22 May 1997. – Minsk : Publ. Belorusion State univ., 1997. vol. 2, P. 130–134.
19. Дозорський В.Г. Метод виявлення проявів ішемічної хвороби серця для медичних систем контролю стану пацієнта / В.Г. Дозорський, В.В. Фалендиш, Л.Є. Дедів, Ю.Б. Паляниця // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Випуск 1 частина 1 (90). – 178 с.
20. Драган Я.П. Обґрунтування структури системи дистанційної діагностики адаптаційних резервів серця / Я.П. Драган, Ю.Б. Паляниця, О.В. Гевко, І.Ю. Дедів // НАУКОВИЙ ВІСНИК НЛТУ України : збірник науково-технічних праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2015. – Вип. 25.10. – 364 с.

Рецензія/Peer review : 21.3.2016 р.

Надрукована/Printed : 18.4.2016 р.

Рецензент : Пастух О.А.