

Й. І. СТЕНЦЕЛЬ, д-р техн. наук, проф. СНУ ім. В.Даля, Луганськ;
А. В. РЯБІЧЕНКО, канд. техн. наук, с.н.с. СНУ ім. В.Даля, Луганськ;
Л. І. ПЕТРОСЯН, лікар-кардіолог, Луганськ;
К. А. ЛІТВІНОВ, студент, СНУ ім. В.Даля, Луганськ

ПРИНЦИП РЕОЛОГІЧНИХ ПЕРЕХОДІВ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ РОБОТИ СЕРЦЕВОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЧНИМ МЕТОДОМ

У роботі наведені результати досліджень електрокардіограм роботи серця при різних діагностичних його захворюваннях. Показано, що серце являє собою об'єкт періодичної дії, робота якого здійснюється за відповідними реологічними переходами, котрі характеризуються стоком електричної енергії.

Ключові слова: електрокардіограма, серце, реологічний перехід, діагностика, електричний потенціал, імпульс, м'яз міокарду.

Вступ. Електрокардіографія (ЕКГ) як метод функціональної діагностики роботи серця, постійно вдосконалюється і, в першу чергу, за рахунок вивчення електропровідності серцевої системи, до складу якої можна віднести такі її елементи: генератори електричних імпульсів, електропровідні лінії, приймачі імпульсів, відділи серця, системи зворотного зв'язку тощо. Серцева система працює в «автогенераторному» режимі за відповідною циклограмою. У [1, 2] вказується, що серце збуджується електричними імпульсами, а функцією збудження володіють клітини біологічної провідникової системи. Під дією електричних збуджуючих імпульсів (ЕЗІ), котрі формуються синусним вузлом, проходить скорочення м'язу міокарда, що призводить до початку роботи серця, тобто ще до відкриття першого шлуночка. Наступні такти роботи серця здійснюються з відповідною затримкою в часі, яка необхідна, по перше, для контролю виконаної роботи попереднього циклу і, по-друге, для формування відповідного сигналу на початок роботи наступного такту (роботи наступного шлуночка).

Аналіз останніх досліджень та літератури. Робота серцевої системи, як правило, характеризується за зміною електричного потенціалу (ЕП), який формується у відповідних точках людського організму. У цих точках вимірювання амплітуда ЕП має максимальне значення. За формою та характером зміни ЕП здійснюється діагностування роботи серцевої системи та її відповідних елементів. На даний час існують відповідні нормовані показники (електрокардіограми), які характеризують роботу серцевої системи «умовно» здорової людини. Відхилення цих показників від їх нормованих значень, свідчить про порушення роботи такої серцевої системи. Вимірювана електрокардіографом напруга електричного потенціалу (НЕП), криву зміни в часі якої називатимемо трендом, у

© Й. І. Стенцель, А. В. Рябіченко, Л. І. Петросян, К. А. Літвінов, 2013

кожній досліджуваній точці має свою відповідну форму і надає лікарю-кардіологу можливість оцінювати стан здоров'я людини. Кожний тренд розділяється на такі основні частини: область підготовки циклу тривалістю τ_1 з початковою НЕП E_0 , область максимальної НЕП тривалістю τ_2 (від точки А до В) з НЕП E_1 , область формування наступного імпульсу НЕП тривалістю τ_3 (від точки В до С) і області циклу роботи першого шлуночка тривалістю τ_4 (відстань А-А), як показано на рис. 1.

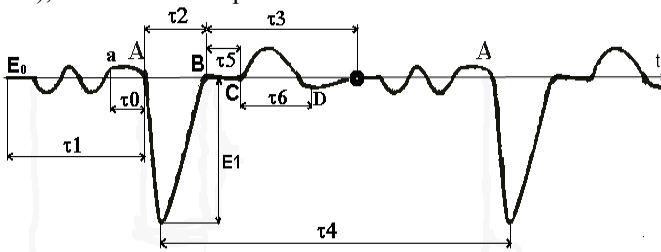


Рис. 1 – Форма тренду електрокардіограми НЕП

Аналіз ЕКГ показує, що ЕЗІ на запуск нового циклу роботи м'язу міокарда формується за час τ_0 до початку її скорочення (точка *a*), а скорочення м'язи починається в точці «А». У зв'язку з цим, виникають питання: щодо принципів формування визначальних точок (*a*, А, В, С і D), як вони змінюються в часі, які фактори впливають на їх зміну та положення на тренді, чому змінюється форма головного імпульсу напругою E_1 , яким чином створюється затримка в часі τ_5 , чим формується та яку функцію виконує імпульс між точками С–D тощо.

Мета дослідження, постановка задачі. Метою дослідження є вивчення процесів перенесення електричного потенціалу в серцевій системі на основі теорії реологічних переходів для виявлення нових показників діагностування стану здоров'я людини. Якщо серцева система має джерело живлення та накопичувач електричної енергії, то підключення останнього до споживача може здійснюватися тільки з допомогою управляючого перемикача, який включається командою від деякого відділу серцевої системи, а відключається або за деяким заданим часом, або за командою (наприклад, при зменшенні тиску крові в відповідному шлуночку серця). Згідно з теорією перенесення імпульсу електричної енергії, приймач електричної енергії повинен спочатку відхилитися на певну величину E_1 від свого сталого стану E_0 , а потім здійснювати власні коливання з певною частотою ω_0 з наступним їх загасанням зі ступенем загасання α . Частота коливань, яку називатимемо несучою частотою f , повинна бути достатньо високою, яка швидко загасає при перенесенні її через біологічний об'єкт. За рахунок цього електрокардіографом сприймається тільки обвідна лінія цих високочастотних коливань.

Матеріали досліджень. Під дією ЕЗІ м'яз міокарду (ММ) деформується (скорочується), що призводить до відкриття клапана першого шлуночка. Після припинення дії електродинамічного зусилля ММ здійснює вільні коливання, частота яких визначається біологічним електромагнітним полем (БЕМП) людини [3]. З іншої сторони, коливання ММ наводять електрорушійну силу (ЕРС) з частотою цих коливань, яка створює електродинамічне зусилля, котре направлено протилежно до напрямку руху ММ, створюючи гальмуючу дію. За рахунок цього загасання коливань ММ здійснюється достатньо швидко, що приводить до формування деякої інтегральної δ – функції Дірака. Виходячи зі сказаного, в ММ протікають електромагнітні процеси, котрі супроводжуються перетвореннями електричної енергії в механічну та навпаки [4, 5]. Нехай у деякій розглядуваній області ММ існує неоднорідне біологічне тіло (елемент біотканини м'язу, який жорстко закріплений за периметром). Неоднорідність розподілення потенціалу перенесення $\varphi(\vec{r}, \theta)$ електричної енергії ЕЗІ приводить до відхилення від стану рівноваги ММ і є причиною виникнення потоків перенесення. У цій області має місце механічний рух, який характеризується полем швидкостей $v(\vec{r}, \theta)$, де \vec{r} - вектор направленості руху перенесення; θ - час перенесення механічної енергії руху ММ. Джерела або стоки потенціалу перенесення γ характеризуються об'ємною напруженістю електричного поля $E(\vec{r}, \theta)$ ММ. Перенесення потенціалу φ через поверхню розглядуваного об'єму складається з перенесення за рахунок руху та потоку перенесення УЗВ, який позначимо через \vec{Q} . Таким чином, електричний потік \vec{Q} ЕЗІ витрачається на механічний рух ММ, який виконується зі швидкістю \vec{v} і може бути записаний у вигляді

$$\vec{Q} = \vec{\varphi} \cdot \vec{v} + \vec{q}. \quad (1)$$

В інтегральній формі умова зберігання електричного потенціалу для даного об'єму V ММ має наступну форму

$$\int_V \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} dV = \int_S Q d\vec{f} + \int_V \gamma dV, \quad (2)$$

де S - поверхня; $d\vec{f} = \vec{n} d\zeta$ - елемент поверхні; \vec{n} - одиничний вектор елемента $d\zeta$.

Для довільного об'єму рівняння (2) приймає наступну форму

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \text{div } Q - \gamma = 0. \quad (3)$$

де γ - джерело потенціалу перенесення електричного поля.

Стік напруженості електричного поля обумовлений вторинними механічними коливаннями ММ. Тому його можна розділити на дві частини: стік γ_M , який обумовлений тертям ММ при його механічному русі в біологічному сере-

довищі, і стік γ_E , який обумовлений гальмуючою дією створюваної в ММ ЕРС. Враховуючи сказане, рівняння для стоку напруженості електричного поля в ММ запишемо таким чином:

$$\gamma = \gamma_M + \gamma_E. \quad (4)$$

З врахуванням (4) рівняння (1) приймає такий вигляд

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \vartheta} + \operatorname{div}(\varphi, \vec{v}) = -\operatorname{div} \bar{q} + \gamma_M + \gamma_E. \quad (5)$$

Якщо в розглядуваному об'ємі ММ має місце перетворення електричної енергії в механічну, то, позначивши $H(\vec{r}, \vartheta)$ - напруженість електричного поля, $v_i(\vec{r}, \vartheta)$ - швидкість зміни електричного поля і $\gamma_M(\vec{r}, t)$ - інтенсивність стоку механічної енергії в одиницю об'єму за одиницю часу t , $\gamma_E(\vec{r}, t)$ - інтенсивність стоку електричної енергії в одиницю об'єму за одиницю часу t рівняння перенесення напруженості електричного поля ММ приймає наступну форму

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} + \operatorname{div}(H, \vec{v}) = \operatorname{div}(D\nabla H) + \gamma_M(\vec{r}, t) + \gamma_E(\vec{r}, t). \quad (6)$$

Рівняння (6) враховує такі важливі фактори, як втрати (стік) механічної та електричної енергії ММ, що є надзвичайно важливим при діагностуванні його роботи.

Якщо механічний рух ММ в електричному полі незначно відрізняється від зміни його електромагнітного поля (ЕМП), то можна прийняти, що різниця зміни швидкості механічного руху та електричного поля приблизно дорівнює нулю, тобто $\Delta \vec{v}(\vec{r}, 0) = \vec{v}_M(\vec{r}, \vartheta) - \vec{v}_E(\vec{r}, \vartheta) = 0$. При такому припущенні рівняння перенесення напруженості електричного поля в ММ приймає наступну форму

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} = \operatorname{div}(D\nabla H) + \gamma_E(\vec{r}, t). \quad (7)$$

Якщо параметр D мало залежить від процесу перенесення, то рівняння (7) спрощується :

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} = D\nabla^2 H + \gamma_E. \quad (8)$$

Припустимо, що в деякому елементарному об'ємі знаходиться ММ, котрий в деякий момент часу $t > 0$ пов'язується ЕМП напруженістю H_0 . При часі $t \rightarrow \infty$ перехідний процес перенесення електричної енергії в ММ закінчується. Так як параметр γ_E пропорційний напруженості H ЕМП ММ, тобто $\gamma_E = k_H H$, то його зміна в часі може мати тільки дві форми. Першою формою є механічна енергія, яка створювана електричним імпульсом, а другою формою є електромагнітна енергія, яка створюється рухом ММ. Враховуючи, що ММ є електропровідним, який характеризується активним опором, індуктивністю та ємністю, і по якому протікає електричний струм i , створуваним електричним

імпульсом, то вільна складова перехідного процесу, яка характеризує втрати електричної потужності, має вигляд

$$\tau_{2\Pi}^2 \frac{d^2 i}{d\theta^2} + \tau_{1\Pi} \frac{di}{d\theta} + i = 0, \quad (9)$$

де $\tau_{2\Pi}, \tau_{1\Pi}$ - сталі часу перехідного процесу ММ.

Напруженість електричного поля ММ $H_{\Pi} = K_{\Pi} i$, де K_{Π} - стала. Підставимо це рівняння в (9). У результаті маємо

$$\tau_{2K}^2 \frac{d^2 H_{\Pi}}{d\theta^2} + \tau_{1K} \frac{dH_{\Pi}}{d\theta} + H_{\Pi} = 0, \quad (10)$$

де $\tau_{1K} = K_{\Pi} \tau_{1\Pi}$, $\tau_{2K} = K_{\Pi} \tau_{2\Pi}$.

Якщо рахувати, що напруженість ЕЗІ повністю передається ММ, то повинна виконуватися умова

$$H_{\Pi}(\theta) = \Psi \frac{\partial H}{\partial \vartheta}, \quad (11)$$

де Ψ - стала процесу перенесення.

Продиференціюємо ліву і праву частини рівняння (11) по θ . У результаті маємо

$$\frac{\partial H_{\Pi}}{\partial \theta} = \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial \vartheta \partial \theta}. \quad (12)$$

З врахуванням (11) і (12) рівняння (8) приймає наступну форму.

$$\frac{\partial H}{\partial \theta} + \Psi \frac{\partial^2 H}{\partial \vartheta \partial \theta} = D \nabla^2 H + \gamma_E. \quad (13)$$

Якщо стала $\Psi \rightarrow \infty$, а $\theta \approx \vartheta$, то $\partial^2 H / \partial \vartheta^2 \rightarrow 0$. У цьому випадку перенесення напруженості ЕМП в ММ відсутнє. При $\Psi = \tau_{\Pi}$ і $\theta = \vartheta$ рівняння (13) приймає наступну форму

$$\tau_{\Pi} \frac{\partial^2 H_{\Pi}}{\partial \vartheta^2} + \frac{\partial H_{\Pi}}{\partial \vartheta} = D \nabla^2 H + \gamma_E. \quad (14)$$

Після переходу від повної похідної до часткової рівняння (14) приймає вигляд

$$\tau_{2\Pi}^2 \frac{d^3 H_{\Pi}}{d\vartheta^3} + \tau_{1\Pi} \frac{d^2 H_{\Pi}}{d\vartheta^2} + \frac{dH_{\Pi}}{d\vartheta} = D \nabla^2 H + \gamma_E. \quad (15)$$

Ліва частина рівняння (15) характеризує зміну напруженості ММ, яка викликає механічну дію, а права – зміну напруженості цього поля. Так як у ММ мають місце втрати напруженості, то, приймаючи, що $\gamma_E = \partial H / \partial t$, де t - час стоку електромагнітної енергії, рівняння (15) набуває такого вигляду

$$\tau_{2\Pi}^2 \frac{d^3 H_{\Pi}}{d\vartheta^3} + \tau_{1\Pi} \frac{d^2 H_{\Pi}}{d\vartheta^2} + \frac{dH_{\Pi}}{d\vartheta} = -D \nabla^2 H - \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (16)$$

Таким чином, електромагнітний процес, який протікає в ММ, описується нелінійним диференціальним рівнянням. Знак «мінус» у рівнянні (16) показує, що має місце зменшення механічної енергії, а відповідно й зменшення електромагнітної енергії в ММ.

Структурно фізичну модель електромагнітних перетворень можна подати у формі реологічних перетворень, як показано на рис. 2.

Згідно з теорією реологічних перетворень в ММ мають місце наступні послідовні переходи:

- ЕЗІ з амплітудою E_0 створює в ММ електродинамічне зусилля E_δ (зусилля Ампера);
- зусилля E_δ приводить у механічний рух ММ, переміщаючи на деяку відстань r ;
- вільний механічний рух ММ створює власні механічні коливання з частотою f ;
- власні механічні коливання індують електрорушійну силу (ЕРС), яка створює напруженість H ЕМП;
- ЕМП створює відповідний імпульс, який дозволяє початок роботи наступного елемента серцевої системи.

Область інтегральної імпульсної дельта функції Дірака показана на електрокардіограмі рис. 2.

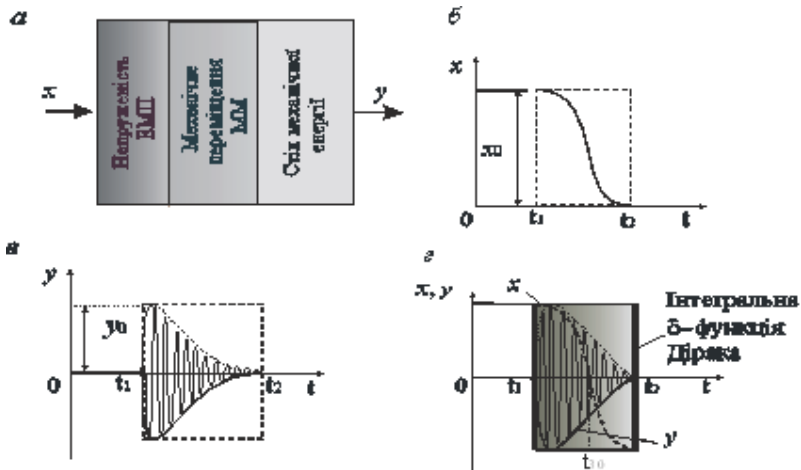


Рис. 2 –Графіки незворотних реологічних перетворень ММ за час t :
 а – фізична модель; б – графік незворотного реологічного перетворення вільного відхилення ММ при припиненні дії ЕЗІ;
 в – графік незворотного реологічного переміщення ММ; з – графік інтегральної імпульсної δ – функції Дірака

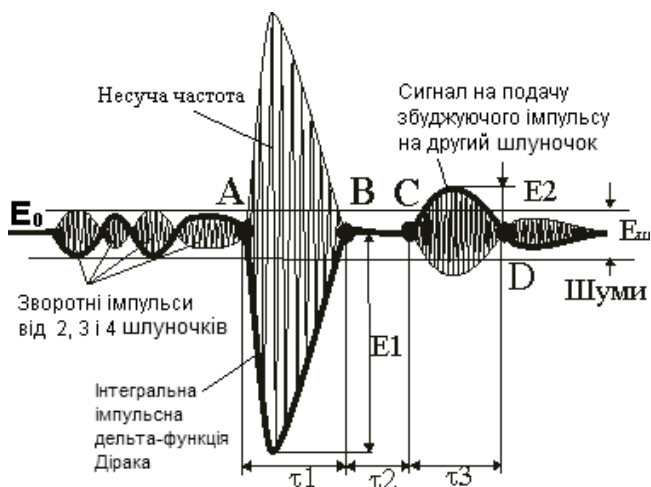


Рис. 3 - Електрокардіограма першого шлуночка серця здорової людини

Виходячи з фізичної моделі роботи м'язу міокарда, рівняння (16) являє собою нелінійну математичну модель, з якої видно, що права її частина описує процес дії напруженості ЕЗІ, а ліва частина – стік напруженості електромагнітного поля за рахунок роботи ММ. Так як електрокардіограма являє собою графік зміни напруги електричного поля в часі t , то сталі часу $\tau_{1П}$, $\tau_{2П}$ а також параметр D і час стоку енергії ЕМП \mathcal{Q} повністю визначатимуть роботу першого шлуночка серцевої системи.

Результати досліджень. Аналіз рівняння (16) показує, що права його частина формально описує процес перенесення електричного збуджуючого сигналу в м'яз міокарду за час t і залежить від коефіцієнта перенесення D , який визначає електричні властивості ММ. Чим більший коефіцієнт D , тим менший ризик захворювання інфарктом міокарда. Немаловажне значення має відношення сталих часу $\tau_{1П} / \tau_{2П}$. Як видно з рис. 3, це відношення повинно бути значно меншим 2 для того, щоби амплітуда обвідної напруги $E1$ була максимальною, а час дії першого імпульсу τ_1 був достатньо малим (відповідав нормованому значенню здорової людини). Ступінь загасання α_1 зміни цієї напруги повинен бути достатньо великим, не меншим 0,95. Якщо прийняти, що $\alpha_1 = -\tau_{1П} / 2\tau_{2П}^2 \approx 0,95$, то $\tau_{1П} / \tau_{2П} \approx 1,9\tau_{2П}$. Звідси видно, що тривалість імпульсу $E1$ визначатиметься сталою часу $\tau_{2П}$. За аналогією роботи мембрани [7] сталі часу дорівнюють: $\tau_{1П} = k_M \beta / \delta$, $\tau_{2П} = \sqrt{m / \delta}$, де k_M - коефіцієнт демпфірування ММ; β - коефіцієнт тертя; δ - жорсткість; m - маса. Виходячи

зі сказаного, бачимо, що відношення сталих часу стоку електричної енергії в ММ $N = k_M \beta / \sqrt{m\delta} = 1,9\tau_{2П}$ або $N \approx 0,5k_M \beta \delta$. Можна рахувати, що коефіцієнт тертя β для ММ змінюється незначно, зміною якого можна знехтувати. Так як $N \ll 2$, то з цього випливає, що для оцінки стану роботи першого шлуночка серця необхідно, щоби добуток $k_M \delta$ був достатньо малим.

Висновки. Отримані результати показують, що за трендом роботи м'яза міокарда можна діагностувати роботу серцевої системи з метою прогнозування стану здоров'я людини. Як показують результати. Клінічні експериментальні і теоретичні дослідження показують, що для оцінки стану роботи серцевої системи за електрокардіограмою можна використовувати параметри роботи елементів цієї системи, котрі є характерними для неї і можуть бути визначені за амплітудою напруги $E1$ основного імпульсу (інтегральної імпульсної дельта-функції Дірака) та часом $\tau1$ його тривалості.

Список літератури: 1. Орлов. В.Н. Руководство по электрокардиографии. – М.: Медицина, - 1984. - 528 с. 2. Дегтярь Г.Я. Электрокардиографическая диагностика. – М.: Медицина, - 1966. - 386 с. 3. Минкин Р.Б., Павлов Ю.Р. Электрокардиография и фонокардиография. – Л.: Медицина, - 1980. – 458 с. 4. Стенцель Й.І., Томсон А.В., Рябіченко А.В. Математичні моделі ультразвукових рівнемірів рідин. МНТЖ „Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2006. №2 (28). – с.55-58. 5. 11. Стенцель Й.І., Томсон А.В. Електродеформаційні процеси в п'єзоелектричних перетворювачах // Системи контролю і управління технологічними процесами : Сборник научных статей / Под общ. ред. В.В. Елисеева. – Луганск: Світлиця, 2006. – С. 144 – 149. 6. Стенцель Й.І., Євсюков В.В., Петросян Л.І., Помсценко А.Ф. Математичні моделі хлопаючі мембран першого роду. Весник національного технічного університета «ХПІ». Сб. науч. Трудов. Тематический выпуск: Приборы и методы неразрушающего контроля. – Харьков: НТУ «ХПИ» - №48. – 2008. - с. 49-55.

Надійшла до редколегії 19.04.2013

УДК 616.12-073.97(035)

Принцип реологічних переходів при діагностуванні роботи серцевої системи електрокардіографічним методом / Й. І. Стенцель, А. В. Рябіченко, Л. І. Петросян, К. А. Літвінов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 34 (1007). – С. 24 –31. Бібліогр.: 6 назв.

У работе приведены результаты исследований электрокардиограмм работы сердца при различных диагностических его заболеваниях. Показано, что сердце представляет собой объект периодического действия, работа которого осуществляется по соответствующим реологическим переходам, которые характеризуются стоком электрической энергии.

Ключевые слова: электрокардиограмма, сердце, реологический переход, диагностика, электрический потенциал, импульс, мышца миокарда.

The results of researches of electrocardiogram of work of the heart at various diseases are given. It is shown that the heart is periodic object. It is shown that work of the heart is carried out on the base of the rheological transitions, which are characterized by power drain.

Keywords: the electrocardiogram, the heart, the rheological transition, the diagnostics, the electrical potential, the impulse, the muscle of infarction.