

Л.С. ФАЙНЗИЛЬБЕРГ, д-р техн. наук, доц., Міжнародний науково-учебний центр інформаційних технологій і систем НАН України і МОН України, Київ,

К.Б. ОРИХОВСКАЯ, асп., Міжнародний науково-учебний центр інформаційних технологій і систем НАН України і МОН України, Київ

НОВЫЙ ПОДХОД К ОБНАРУЖЕНИЮ ЭФФЕКТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АЛЬТЕРНАЦИИ СЕРДЦА ПО ОДНОКАНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЕ

Рассматривается метод обнаружения эффекта электрической альтернации сердца, основанный на анализе перестановочной энтропии, которая вычисляется по массиву показателей одноканальной электрокардиограммы в скользящих окнах. Представлены результаты исследования метода на модельных и реальных данных. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: электрическая альтернация сердца; перестановочная энтропия; электрокардиограмма.

Постановка проблемы. Один из предикторов внезапной сердечной смерти, который в последнее время получил широкую известность в клинических исследованиях, основан на анализе, так называемой, электрической альтернации сердца [1 – 3]. В то же время, по мнению специалистов, существующие компьютерные алгоритмы не обеспечивают требуемую надежность обнаружения этого эффекта в реальных клинических условиях.

Сложность решения задачи обусловлена тем, что реальные сигналы с наличием и отсутствием электрической альтернации внешне практически неразличимы (рис. 1) [4].

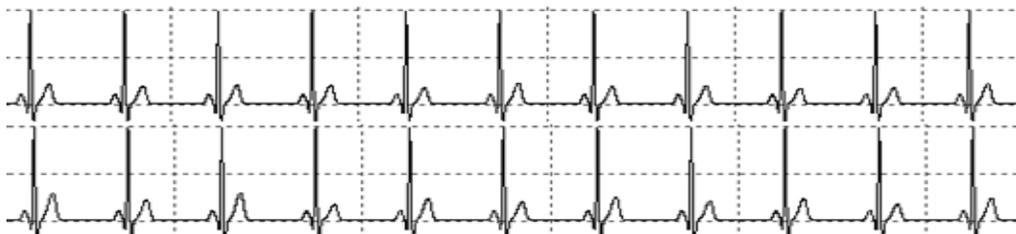


Рис. 1. Электрокардиограмма со случайным искажением (вверху) и альтернатией (внизу) зубца *T*

Согласно [5], диагностически значимый уровень альтернации зубца

T составляет всего 5 – 10 мкВ. Надежное обнаружение таких тонких изменений сигнала на фоне возможных искажений, вызванных случайными возмущениями, требует применения эффективных компьютерных алгоритмов.

Анализ литературы. Один из известных подходов к построению компьютерных алгоритмов анализа альтернации зубца основан на алгоритме быстрого преобразования Фурье и обнаружении характерного пика на частоте, равной половине частоты сердечных сокращений [6]. В то же время такой алгоритм может давать приемлемые результаты лишь в том случае, когда амплитуда зубца T изменяется по синусоидальному закону.

Для повышения достоверности результатов в работе [7] предложено оценивать степень альтернации на основе спектральных составляющих разложения по функциям Уолша. Такой алгоритм позволяет обнаружить эффект альтернации, который проявляется не только в чередовании амплитуд, но и симметрий зубца T .

В клинической практике наблюдаются также другие типы альтернации, в частности, чередование зубцов T с разной продолжительностью [8]. Возможны также сочетания различных типов альтернации на одной электрокардиограмме (ЭКГ).

Практика показывает, что в реальных ситуациях фаза чередования зубцов может изменяться в случайные моменты времени. В таких ситуациях анализ альтернации на основе спектральных разложений приводит к ошибочным результатам.

Кроме того, спектральные методы обладают существенным недостатком: для получения корректных оценок требуется с помощью дополнительных стимулирующих катетеров в течение продолжительного времени (более 5 минут) поддерживать стабильные значения частоты сокращения сердца (ЧСС) на высоких уровнях (не менее 100 уд/мин), что не всегда безопасно для пациента [6].

Поэтому получили известность методы анализа альтернации зубца T , основанные на обработке ЭКГ во временной области, в частности, на оценке усредненных значений амплитуд четных и нечетных зубцов T [5]. Однако такой алгоритм эффективен лишь при четком чередовании зубцов различных типов.

Для расширения возможностей компьютерного обнаружения эффекта электрической альтернации сердца в [9] предложен более совершенный алгоритм, основанный на анализе формы гистограммы, характеризующей распределение параметров зубцов. Признаком альтернации является дву-modalность гистограммы и выполнение дополнительных условий, налагаемых на подмножества индексов элементов ЭКГ.

Этот алгоритм основан на предположении, что при электрической альтернации амплитуды зубцов T порождаются двумя случайными величинами Y_A и Y_B , которые с ограниченными дисперсиями варьируют относительно "своих" средних значений $M\{Y_A\} \neq M\{Y_B\}$, причем

$$Y_A \in [Y_A^{\min}, Y_A^{\max}], \quad Y_B \in [Y_B^{\min}, Y_B^{\max}] \quad (1)$$

и

$$Y_A^{\max} < Y_B^{\min} \quad \text{или} \quad Y_B^{\max} < Y_A^{\min}. \quad (2)$$

Однако из-за случайных возмущений в реальных условиях ограничение (2) может не выполняться.

Цель статьи – разработать надежный алгоритм обнаружения эффекта альтернации, основанный на анализе хаотичности последовательностей амплитудно-временных параметров элементов ЭКГ, и оценить эффективность алгоритма на модельных и реальных данных.

Математические основы предлагаемого метода. Пусть

$$a_1, a_2, \dots, a_M \quad (3)$$

– массив значений параметров, наблюдаемых на последовательности сердечных циклов, например, массив значений амплитуд зубцов T .

Разобьем массив (3) на L последовательных окон, в каждом таком l -м окне оценим хаотичность H_l значений исследуемого показателя и вычислим отношение H_l к хаотичности H_1 элементов в первом окне:

$$h_l = \frac{H_l}{H_1} \cdot 100\%, \quad l=1, \dots, L, \quad (4)$$

полагая, что $H_1 \neq 0$.

Для оценки H_l будем использовать алгоритм вычисления перестановочной энтропии

$$H_l = - \sum_{j=1}^5 p(\pi_{jl}) \log_2 p(\pi_{jl}), \quad (5)$$

в которой $p(\pi_{jl})$ – частота появления паттерна j -го класса в l -м окне.

Перестановочная энтропия (5) характеризует разнообразие формы пяти классов паттернов (рис. 2), образованных тройкой последовательных значений a_{m-1}, a_m, a_{m+1} массива (3).

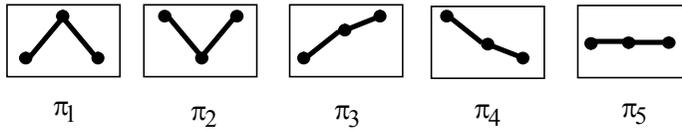


Рис. 2. Классы паттернов перестановочной энтропии

Для обеспечения плавности изменения энтропии процедура (4) реализуется при сдвиге $l+1$ -го окна по отношению l -му на одну точку (режим скользящего окна).

Применение специальных вычислительных процедур позволяет отобразить последовательность H_l на плоскости $h(l), \dot{h}(l)$, где $\dot{h}(l)$ – оценка первой производной $h(l)$ в l -й точке, и определить площадь S выпуклой оболочки, построенного таким образом фазового портрета энтропии (ФПЭ) (рис. 3).

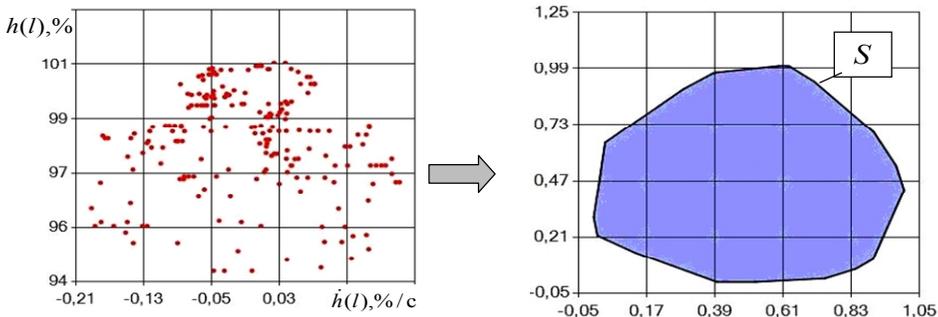


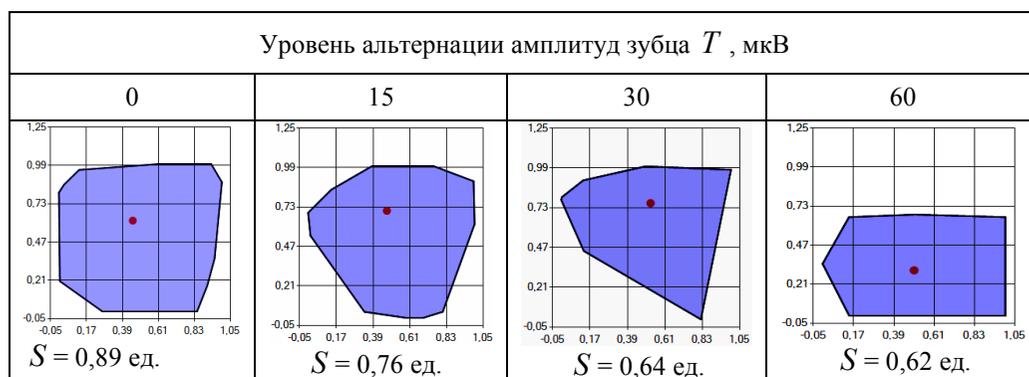
Рис. 3. ФПЭ (слева) и его выпуклая оболочка (справа)

Модельные эксперименты. Для оценки эффективности предложенного подхода использовалась генеративная модель порождения искусственных ЭКГ реалистической формы [10], с помощью которой генерировались тестовые сигналы с различными значениями уровня альтернации амплитуд зубца T на фоне 15 % случайных искажений.

Несмотря на то, что модельные сигналы были практически неразличимы, площадь S выпуклой оболочки фазового портрета энтропии (ФПЭ) монотонно уменьшалась по мере нарастания альтернации зубца T , т.е. по мере увеличения доли регулярной составляющей в изменчивости амплитуд.

При уровне альтернации 60 мкВ площадь S уменьшилась более чем на 30 % (от 0,89 ед. до 0,62 ед.) по сравнению с сигналом без альтернации (табл. 1).

Таблиця 1

Площади S выпуклых оболочек ФПЭ

Адекватные результаты получены также и при обработке реальных ЭКГ. Площадь выпуклой оболочки ФПЭ, вычисленная по ЭКГ пациента с альтернатией продолжительностей RR -интервалов была почти в 4 раза ниже, чем у здорового пациента с внешне похожей ЭКГ.

Выводы. Предложен новый метод обнаружения электрической альтернации сердца, который, в отличие от ранее известных, основан на оценке изменения значения перестановочной энтропии по ходу наблюдения сигнала. Применение специальных вычислительных процедур позволяет оценить первую производную перестановочной энтропии и вычислить площадь выпуклой оболочки ее фазового портрета (ФП).

Проведенные исследования подтвердили, что площадь выпуклой оболочки ФП позволяет надежно обнаружить электрическую альтернацию сердца, в том числе RR -интервалов и симметрии зубца T , и использовать этот показатель в качестве предиктора внезапной сердечной смерти.

Список литературы: 1. Файнзильберг Л.С. Основы фазаграфии / Л.С. Файнзильберг. – Киев: Освита України, 2017. – 264 с. 2. Sakabe K. Comparison of T-wave alternans and QT interval dispersion to predict ventricular tachyarrhythmia in patients with dilated cardiomyopathy and without antiarrhythmic drugs: a prospective study / K. Sakabe, T. Ikeda, T. Sakata // Japanese Heart Journal. – 2001. – Vol. 42. – №. 4. – P. 451-457. 3. Bloomfield D.M. Microvolt T-Wave Alternans Distinguishes Between Patients Likely and Patients Not Likely to Benefit From Implanted Cardiac Defibrillator Therapy / D.M. Bloomfield, R.S. Steinman // Circulation. – 2004. – №. 110. – P. 1885-1889. 4. Predescu D. Microvolt T wave alternans (MTWA) – a new non-invasive predictor of sudden cardiac death / D. Predescu, P. Mitrut, A. Giuca // Romanian Journal of Internal Medicine. – 2004. – Vol. 42. – №. 3. – P. 647-656. 5. Nearing B.D. Modified moving average analysis of T-wave alternans to predict ventricular fibrillation with high accuracy / B.D. Nearing, R.L. Verrier // Journal of Applied Physiology. – 2002. – Vol. 92. – P. 541-549. 6. Rosenbaum D.S. Electrical alternans and vulnerability to ventricular arrhythmias

/ D.S. Rosenbaum, L.E. Jackson, J.M. Smith // *New England Journal of Medicine*. – 1994. – № 330. – P. 235-241. 7. Мельник О.В. Метод виявлення альтернанти Т-зубця електрокардіосигнала / О.В. Мельник // *Биомедицинская радиоэлектроника*. – 2008. – № 7. – С. 56-59. 8. Verrier R.L. Median beat analysis of T-wave alternans to predict arrhythmic death after myocardial infarction: results from the Autonomic Tone and Reflexes after Myocardial Infarction Study / R.L. Verrier, B.D. Nearing, M.T. LaRovere, G. Pinna, M.A. Mittleman, J.T. Bigger, P.J. Schwartz // *Circulation*. – 2000. – № 102. – P. 711-713. 9. Файнзильберг Л.С. Спосіб оцінювання електричної альтернанти серця / Л.С. Файнзильберг, В.П. Сакун, В.В. Соловійов // Патент України на винахід № 101918. – 2013. – Бюл. № 9. 10. Fainzilberg L.S. T-Wave Alternans Modeling on Artificial Electrocardiogram with Internal and External Perturbation / L.S. Fainzilberg, T.Yu. Bekler // *Journal of Automation and Information Sciences*. – 2012. – Vol. 44. – Issue 7. – P. 1-14.

References:

1. Fainzilberg, L.S. (2017), *Fasegraphy basics*, Osvita Ukrainy, Kyiv, 264 p.
2. Sakabe, K., Ikeda, T. and Sakata, T. (2001), "Comparison of T-wave alternans and QT interval dispersion to predict ventricular tachyarrhythmia in patients with dilated cardiomyopathy and without antiarrhythmic drugs: a prospective study", *Japanese Heart Journal*, Vol. 42, No. 4, pp. 451-457.
3. Bloomfield, D.M. and Steinman, R.S. (2004), "Microvolt T-wave alternans distinguishes between patients likely and patients not likely to benefit from implanted cardiac defibrillator therapy", *Circulation*, Vol. 110, pp. 1885-1889.
4. Predescu, D., Mitrut, P. and Giuca, A. (2004), "Microvolt T wave alternans (MTWA) – a new non-invasive predictor of sudden cardiac death", *Romanian Journal of Internal Medicine*, Vol. 42, No. 3, pp. 647-56.
5. Nearing, B.D. and Verrier, R.L. (2002), "Modified moving average analysis of T-wave alternans to predict ventricular fibrillation with high accuracy", *Journal of Applied Physiology*, Vol. 92, pp. 541-9.
6. Rosenbaum, D.S., Jackson, L.E. and Smith, J.M. (1994), "Electrical alternans and vulnerability to ventricular arrhythmias", *New England Journal of Medicine*, Vol. 330, pp. 235-41.
7. Melnik, O.V. (2008), "The Method for Detection of Electrical Cardiosignal T-Wave Alternation", *Biomedical Radioelectronics*, Vol. 7, pp. 56-9.
8. Verrier, R.L., Nearing, B.D., LaRovere, M.T., Pinna, G., Mittleman, M.A., Bigger, J.T. and Schwartz, P.J. (2000), "Median beat analysis of T-wave alternans to predict arrhythmic death after myocardial infarction: results from the autonomic tone and reflexes after myocardial infarction study", *Circulation*, Vol. 102, pp. 711-713.
9. Fainzilberg L.S., Sakun V.P., Soloviov V.V. (2013), *Method for evaluating the electrical heart alternation*, Patent UA, No. 101918.
10. Fainzilberg, L.S. and Bekler, T.Yu. (2012), "T-Wave alternans modeling on artificial electrocardiogram with internal and external perturbation", *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 44, No. 7, pp. 1-14.

Статью представил д-р техн. наук, проф. каф. ВТІ НТУ "ХПІ" Поворознюк А.І.

Поступила (received) 14.04.2017

Fainzilberg Leonid, Doctor of Technics.
International Research and Training Center for Information Technology
and Systems, NAS and MES of Ukraine
Str. Heroyiv Dnipra, 36-17, Kyiv, Ukraine, 04214

Tel.: (067) 715-15-83, e-mail: fainzilberg@voliacable.com

ORCID ID: 0000-0002-3092-0794

Orikhovska Kseniia, PhD stud.

International Research and Training Center for Information Technology
and Systems, NAS and MES of Ukraine

Str. Borshagivska, 139/141-20, Kyiv, Ukraine, 03056

Tel.: (095) 619-90-03, e-mail: kseniaor@gmail.com

УДК 61.007+004.932.72

Новий підхід до виявлення ефекту електричної альтернації серця по одноканальній електрокардіограмі / Файнзільберг Л.С., Оріховська К.Б. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 144 – 151.

Розглядається метод виявлення ефекту електричної альтернації серця, заснований на аналізі перестановної ентропії, яка обчислюється по масиву показників одноканальної електрокардіограми в ковзних вікнах. Представлені результати дослідження методу на модельних і реальних даних. Ил.: 3. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: електрична альтернація серця; електрокардіограма; перестановна ентропія.

УДК 61.007+004.932.72

Новый подход к обнаружению эффекта электрической альтернации сердца по одноканальной электрокардиограмме / Файнзильберг Л.С., Ориховская К.Б. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 144 – 151.

Рассматривается метод обнаружения эффекта электрической альтернации сердца, основанный на анализе перестановочной энтропии, которая вычисляется по массиву показателей одноканальной электрокардиограммы в скользящих окнах. Представлены результаты исследования метода на модельных и реальных данных. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: электрическая альтернация сердца; электрокардиограмма; перестановочная энтропия.

УДК 61.007+004.932.72

A new approach to detecting the electrical alternation effect of the heart on a single-channel electrocardiogram / Fainzilberg L.S., Orikhovska K.B. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – №. 21 (1243). – P. 144 – 151.

The method of detecting the electrical alternation effect of the heart, based on the permutation entropy analysis, which is calculated from the array of single-channel electrocardiogram parameters in sliding windows, is considered. The results of the research method on model and real data are presented. Figs.: 3. Tabl.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: electric alternation of the heart; electrocardiogram; permutation entropy.