

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 615.47:616–072.7

DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-8

М. Н. Крамм

ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР СЕРДЦА ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ

M. N. Kramm

EQUIVALENT ELECTRIC HEART GENERATOR FOR NON-INVASIVE ELECTROCARDIAC DIAGNOSTICS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Рассматривается способ повышения эффективности неинвазивной кардиодиагностики, основанный на переходе от многоканальных электрокардиосигналов и связанных с ними карт распределения электрического потенциала на поверхности торса к пространственно-временным характеристикам эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС). **Материалы и методы.** Проводится реконструкция распределения эквивалентных электрических источников в сердце в течение кардиоцикла. При обработке используются как записанные электрокардиосигналы, так и координаты электродов на поверхности торса человека. **Результаты.** Представлены карты распределений электрического потенциала на поверхности сердца в различные моменты времени для ЭЭГС поверхностного типа и пространственные треки временной динамики электрической активности сердца в объеме сердца для ЭЭГС дипольного типа. **Выводы.** Результаты реконструкции ЭЭГС показывают возможность наблюдения карт пространственно-временной динамики электрической активности сердца и предназначены для повышения информативности электрокардиографических обследований.

A b s t r a c t. Background. We consider a method for increasing the effectiveness of non-invasive cardiognostics, based on the transition from multichannel electrocardiosignals and related electrical potential distribution maps on the torso surface to the spatio-temporal characteristics of the equivalent electric heart generator (EEHG). **Materials and methods.** We carry out reconstruction of the distribution of the equivalent electrical heart sources of the cardiac cycle. When processing we use both recorded electrocardiosignals and the coordinates of the electrodes, placed on the human torso surface. **Results.** We obtain maps of electric potential distributions on the heart surface at various time points for surface type EEHG and spatial tracks of the temporal dynamics of the heart electrical activity in the volume of the heart for dipole type EEHG. **Conclusions.** The results of the EEHG reconstruction show the possibility of observing the spatio-temporal dynamics maps of the electrical heart activity and are intended to increase the informativeness of electrocardiographic examinations.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрокардиографические отведения, электрический потенциал, торс, сердце, реконструкция, эквивалентный электрический генератор сердца, карты распределений.

Keywords: electrocardiographic leads, electric potential, torso, heart, reconstruction, equivalent electric heart generator, maps of distributions.

Введение

Современная неинвазивная электрокардиология широко использует информационные технологии (ИТ), обеспечивающие регистрацию, сбор, хранение и обработку кардиографической информации. В настоящее время этот своеобразный технологический «конвейер» неинвазивной электрокардиологии помогает врачу при формировании заключения о состоянии сердца пациента [1, 2].

В качестве важного этапа этого конвейера следует рассматривать решение обратной задачи электрокардиографии путем реконструкции эквивалентного электрического генератора сердца (ЭЭГС), которое позволяет неинвазивным путем визуализировать характеристики электрической активности в области сердца [3–5]. При этом повышение достоверности электрокардиодиагностики в отношении получения новой диагностической информации связано с одновременным представлением кардиологам пространственно-временных характеристик как ЭЭГС поверхностного типа – для диагностики нарушения процессов проводимости, так и ЭЭГС дипольного типа – для диагностики ишемии. Предлагается переход от распределений потенциала электрического поля на поверхности торса (карт потенциала на поверхности торса) – к картам распределения источников электрической активности на поверхности эпикарда и пространственно-временным характеристикам электрической активности ЭЭГС дипольного типа в объеме сердца [6]. Существенно также, что такой переход ориентирован на наблюдение более мелких деталей в динамике электрической активности сердца.

Постановка задачи

Многоканальные электрокардиосигналы (ЭКС) регистрируются с помощью системы электродов, распределенных на поверхности грудной клетки в количестве 40–60. После цифровой фильтрации мы располагаем для каждого отсчетного момента времени кардиоцикла массивом значений электрического потенциала в точках расположения электродов. Поскольку электрический потенциал, зарегистрированный с некоторого электрода, является интегральной характеристикой источников электрической активности в сердце, то для получения более детальной кардиографической информации мы решаем обратную задачу – проводим реконструкцию эквивалентного электрического генератора сердца. При этом существенной информацией являются координаты электродов на поверхности торса и опорных точек на поверхности эпикарда. Координаты электродов определяются путем измерения антропометрических параметров на торсе. Координаты точек на поверхности эпикарда определяются путем реконструкции этой поверхности на основе известных координат электродов и электрических потенциалов на этих электродах [7].

Реконструкция эквивалентного электрического генератора сердца поверхностного типа

Электрические потенциалы регистрировались с помощью многоэлектродной системы отведений, показанной на рис. 1 [3]. Электроды были размещены на эластичных поясах на торсе в количестве около 40 в 4–5 рядов (рис. 1,а). После антропометрических измерений определялись координаты электродов x , y и z (рис. 1,а и б).

Пусть $\vec{r}_i = [x_i, y_i, z_i]$, $i = 1..N_e$ – векторы с координатами электродов на поверхности торса. Далее осуществляется переход к достаточно мелкой сетке граничных элементов на поверхности торса с координатами центров этих элементов $[x_k, y_k, z_k]$, $k = 1..N_b$, причем $N_b \gg N_e$. На следующем этапе необходимо путем интерполяции перейти от электрических потенциалов ϕ_i^b , $i = 1..N_e$, измеренных в точках расположения электродов \vec{r}_i , к потенциалам ϕ_k^b , $k = 1..N_b$ на мелкой сетке граничных элементов с центрами $\vec{r}_k = [x_k, y_k, z_k]$. Переход к мелкой сетке граничных элементов путем выполнения интерполяции важен для расширения частотного диапазона пространственного спектра распределения потенциала на эпикарде [8].

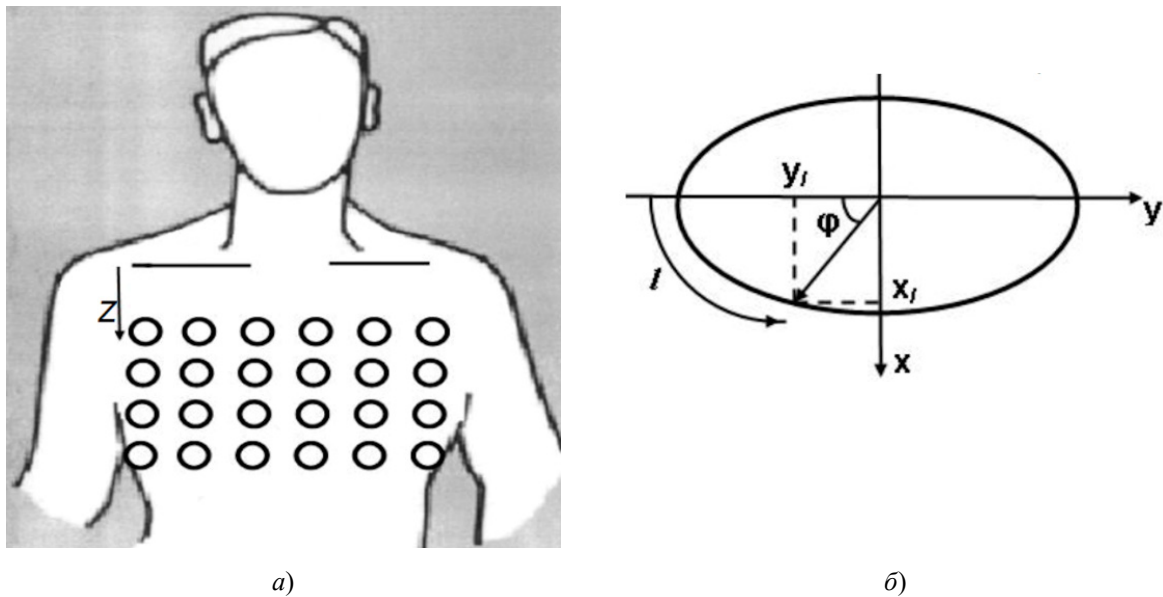


Рис. 1. Многоэлектродная система отведений:
 а – расположение электродов на торсе; б – координаты электродов

Наиболее распространенным способом отображения электрической активности сердца на базе ЭЭГС поверхностного типа (ЭЭГС ПТ) является визуализация распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда [7]. В этом случае говорят о распределении поверхностной плотности дипольного момента электрических источников, которое отражает распределение эквивалентного трансмембранного потенциала на поверхности сердца.

В работе [9], основываясь на теореме Грина [10], показано, что

$$2\pi \cdot u(M) = \int_{S_H} g(P) \cdot \frac{1}{R(M,P)} dS - \int_{S_H} \phi(P) \cdot \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R(M,P)} \right) dS - \int_{S_B} \phi(P) \cdot \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R(M,P)} \right) dS,$$

где ϕ – электрический потенциал; M – точка, которая может находиться на поверхности торса S_B или на поверхности эпикарда S_H ; P – текущая точка интегрирования; $R(M,P)$ – расстояние между точками M и P ; $\partial/\partial n$ – производная по направлению нормали, внешней по отношению к области между поверхностью торса и поверхностью эпикарда; $g = \frac{\partial \phi}{\partial n}$.

При этом в случае нахождения точки M на поверхности интегрирования эта точка должна быть «выколота», т.е. соответствующий интеграл следует рассматривать как несобственный интеграл второго рода.

В рамках метода граничных элементов (МГЭ) [11] в результате дискретизации поверхностей S_B и S_H получаем систему линейных алгебраических уравнений, которая может быть решена итерационным методом Зейделя [12] с последовательным использованием обратных матриц.

В качестве примера рассмотрим результаты реконструкции ЭЭГС ПТ по реальным ЭКС. ЭКС зарегистрированы с помощью 36 электродов, размещенных в четыре ряда на поверхности грудной клетки. Поверхность торса представлялась с помощью сетки, содержащей 30 элементов по вертикали и 60 элементов в горизонтальной плоскости. Использовалась реалистическая триангуляционная модель эпикарда, содержащая 1584 элемента. Реконструкция проводилась в характерные моменты времени, соответствующие вершинам P , R и T зубцов.

Результаты реконструкции ЭЭГС ПТ для данных моментов времени представлены на рис. 2 в виде карт распределения электрического потенциала на поверхности эпикарда.

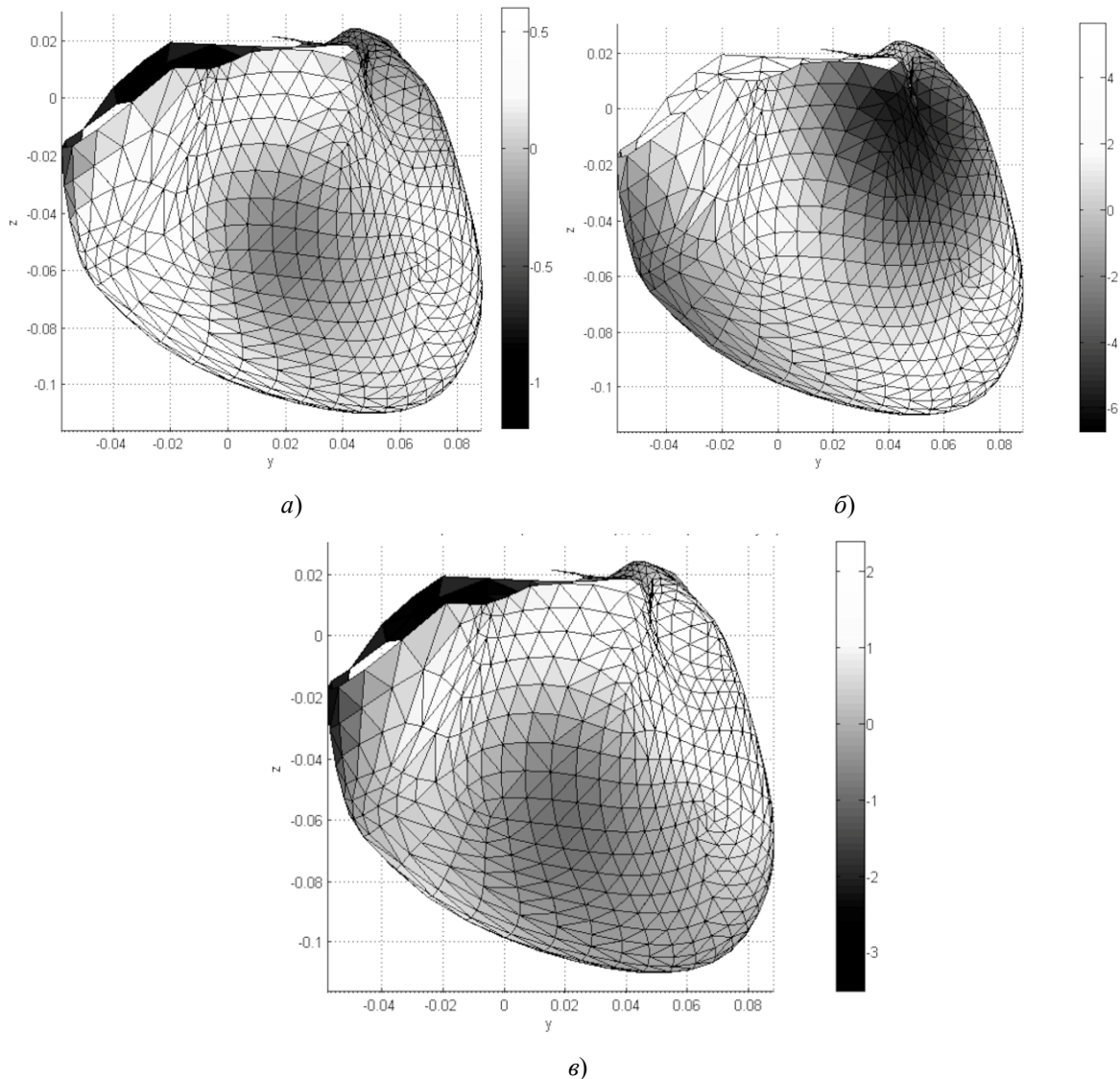


Рис. 2. Потенциал на поверхности эпикарда для вершины P -зубца (а); R -зубца (б); T -зубца (в)

Для большей наглядности полутонная палитра на представленных рисунках выбрана с одинаковым контрастом, который соответствует различным диапазонам изменения электрического потенциала в мВ. Как и следовало ожидать, наибольшие значения потенциала наблюдаются для вершины R -зубца, наименьшие – для вершины P -зубца. Наиболее заметна дипольная структура электрического источника для R -зубца. Располагая значениями потенциалов в различные моменты времени кардиоцикла, можно наблюдать ЭКС непосредственно на поверхности эпикарда.

Реконструкция эквивалентного электрического генератора сердца дипольного типа

С целью наблюдения временной динамики электрической активности сердца ЭЭГС дипольного типа (ЭЭГС ДТ) реконструируется для каждого отсчетного момента времени кардиоцикла. Исходными данными для реконструкции ЭЭГС для момента t_k является вектор измеренных ЭКС $U_k = (U_1(t_k), \dots, U_n(t_k), \dots, U_{N_l}(t_k))$, где $U_n(t_k)$ – ЭКС, снимаемый с n -го электрода, N_l – количество используемых электродов. Также должны быть измерены координаты электродов (x_{ln}, y_{ln}, z_{ln}) , $n \in (1, N_l)$ в системе координат торса. ЭЭГС дипольного типа для всех временных отсчетов кардиоцикла t_k характеризуется вектором параметров $s_k = (x_{sk}, y_{sk}, z_{sk}, M_{xk}, M_{yk}, M_{zk})$, где (x_{sk}, y_{sk}, z_{sk}) – координаты ЭЭГС, (M_{xk}, M_{yk}, M_{zk}) – проекции вектора дипольного момента ЭЭГС [6].

Поскольку задача реконструкции относится к классу математически некорректных задач [13], то для ее решения необходимо решить оптимизационную задачу – найти для всех временных отсчетов кардиоцикла t_k вектор параметров ЭЭГС, при котором достигается минимум функционала

$$\Omega_\alpha = \|U_k - \tilde{U}(s_k)\|^2 + \alpha_k \|s'_k\|^2,$$

где $\tilde{U}(s_k) = (U_1(s_k), \dots, U_n(s_k), \dots, U_{N_i}(s_k))$ – вектор ЭКС, рассчитанных по дипольной модели ЭЭГС с вектором параметров s_k ; $U_n(s_k)$ – модельный ЭКС для n -го электрода; α_k – коэффициент регуляризации; $s'_k = \left(\frac{x_{s_k} - x_{ce}}{R_H}, \frac{y_{s_k} - y_{ce}}{R_H}, \frac{z_{s_k} - z_{ce}}{R_H}, \frac{M_{xk}}{M_{HR}}, \frac{M_{yk}}{M_{HR}}, \frac{M_{zk}}{M_{HR}} \right)$ – нормированный вектор параметров модели ЭЭГС; (x_{ce}, y_{ce}, z_{ce}) – координаты центра модели эпикарда пациента; R_H – усредненный радиус эпикарда; M_{HR} – модуль вектора дипольного момента ЭЭГС дипольного типа для временного отсчета максимума R -зубца кардиоцикла. Вопрос выбора коэффициента регуляризации рассмотрен нами в работе [14].

Временная динамика поведения ЭЭГС ДТ в ходе кардиоцикла может наглядно отображаться пространственными кривыми, характеризующими движение источника в пространстве и движение конца вектора дипольного момента. В качестве примера на рис. 3 показаны треки – линии движения источника для P -, R - и T -зубцов во фронтальной плоскости.

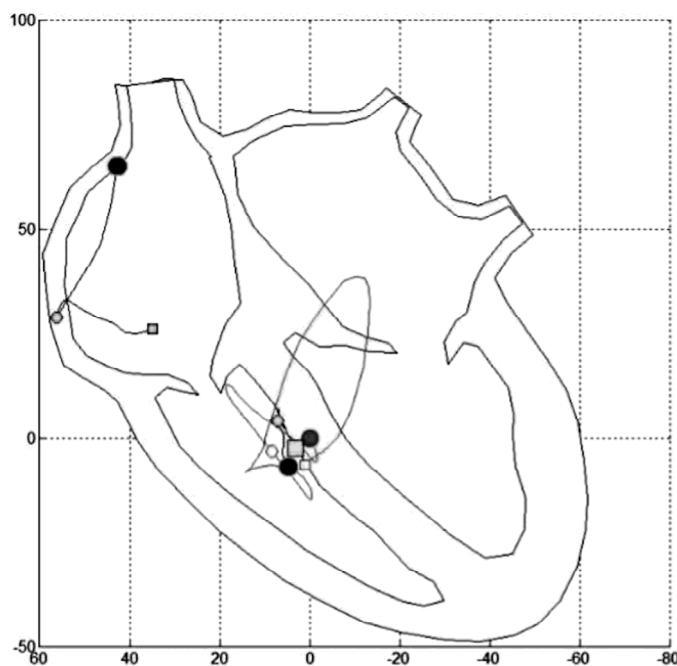


Рис. 3. Треки движения ЭЭГС ДТ во фронтальной плоскости для обследуемого с ИБС

Выводы и заключение

Представленные алгоритмы ориентированы на анализ динамики электрической активности сердца путем пространственно-временного картирования эквивалентных электрических источников сердца. Автором предложено синэргетическое объединение двух подходов к описанию электрической активности сердца: 1) эквивалентный электрический генератор поверхностного типа (ЭЭГС ПТ), характеризующий электрические процессы на поверхности сердца и описываемый пространственно-временными картами электрического потенциала на поверхности эпикарда; 2) эквивалентный электрический генератор дипольного типа (ЭЭГС ДТ), интегрально характеризующий электрические процессы в объеме сердца и описываемый пространственно-временными характеристиками – треками движения ЭЭГС и динамикой изменения модуля и направления вектора дипольного момента. Если подход с использованием

ЭЭГС ПТ ориентирован на диагностику нарушения процессов проводимости, то подход с ЭЭГС дипольного типа ориентирован на диагностику ишемии.

Библиографический список

1. Inverse problem of Electrocardiography / P. W. Macfarlane, A. van Oosterom, O. Pahlm, P. Kligfield, M. Janse, J. Camm // *Comprehensive Electrocardiology*. – 2th ed. – Springer-Verlag London Limited, 2011. – P. 1130–1280.
2. *Мурашко, В. В.* Электрокардиография / В. В. Мурашко, А. В. Струтынский. – Москва : МедПресс, 2019. – 360 с.
3. *Титомир, Л. И.* Неинвазивная электрокардиотопография / Л. И. Титомир, В. Г. Трунов, Э. А. И. Айду. – Москва : Наука, 2003. – 198 с.
4. *Potyagaylo, D.* Binary optimization for source localization in the inverse problem of ECG / D. Potyagaylo, E. G. Cortes, W. H. W. Schulze, O. Dössel // *Medical & Biological Engineering & Computing*. – 2014. – Vol. 52. – P. 717–728.
5. Verification of a new technique for non-invasive electrophysiological examination of the heart, based on solving the inverse problem of electrocardiography / A. Sh. Revishvili, V. V. Kalinin, O. S. Lyadzhina, et al // *Herald of arrhythmology*. – 2008. – Vol. 51. – P. 1–13.
6. Патент РФ 2651068. Способ неинвазивного определения электрофизиологических характеристик сердца / Бодин О. Н., Бодин А. Ю., Жихарева Г. В., Крамм М. Н., Палютин Ю. А., Стрелков Н. И., Черников А. И. – 2018.
7. Reconstruction of equivalent electrical sources on heart surface / G. V. Zhikhareva, M. N. Kramm, O. N. Bodin, R. Seepold, A. I. Chernikov, Y. A. Kupriyanova, N. A. Zhuravleva // 6th International work-conference (IWBBIO 2018, Granada, Spain, April 25–27) : proceedings. – Granada, Spain, 2018. – Part I.
8. *Крамм, М. Н.* Анализ влияния выбора количества электродов на карты распределения электрического потенциала на поверхностях торса и квазиэпикарда / М. Н. Крамм // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2019. – № 3 (33). – С. 61–68.
9. *Титомир, Л. И.* Математическое моделирование биоэлектрического генератора сердца / Л. И. Титомир, П. Кнеппо. – Москва : Наука ; Физматлит, 1999. – 447 с.
10. *Баскаков, С. И.* Электродинамика и распространение радиоволн / С. И. Баскаков. – Москва : ЛИБРОКОМ, 2012. – 416 с.
11. *Бреббия, К.* Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вруубел. – Москва : Мир, 1987. – 524 с.
12. *Ланцош, К.* Практические методы прикладного анализа / К. Ланцош. – Москва : ГИФМЛ, 1961. – 524 с.
13. *Тихонов, А. Н.* Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – Москва : Наука, 1979. – 285 с.
14. *Крамм, М. Н.* Регуляризация способа реконструкции эквивалентного электрического генератора сердца / М. Н. Крамм // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2018. – № 3 (25). – С. 86–92.

References

1. Macfarlane P. W., van Oosterom A., Pahlm O., Kligfield P., Janse M., Camm J. *Comprehensive Electrocardiology*. 2th ed. Springer-Verlag London Limited, 2011, pp. 1130–1280.
2. Murashko V. V., Strutyanskiy A. V. *Elektrokardiografiya* [Electrocardiography]. Moscow: MedPress, 2019, 360 p. [In Russian]
3. Titomir L. I., Trunov V. G., Aydu E. A. I. *Neinvazivnaya elektrokardiotopografiya* [Non-invasive electrocardiography]. Moscow: Nauka, 2003, 198 p. [In Russian]
4. Potyagaylo D., Cortes E. G., Schulze W. H. W., Dössel O. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2014, vol. 52, pp. 717–728.
5. Revishvili A. Sh., Kalinin V. V., Lyadzhina O. S. et al. *Herald of arrhythmology*. 2008, vol. 51, pp. 1–13.
6. Patent RF 2651068. *Sposob neinvazivnogo opredeleniya elektrofiziologicheskikh kharakteristik serdtsa* [Patent RF 2651068. Method for noninvasive determination of electrophysiological characteristics of the heart]. Bodin O. N., Bodin A. Yu., Zhikhareva G. V., Kramm M. N., Palyutina Yu. A., Strelkov N. I., Chernikov A. I. 2018. [In Russian]
7. Zhikhareva G. V., Kramm M. N., Bodin O. N., Seepold R., Chernikov A. I., Kupriyanova Y. A., Zhuravleva N. A. *6th International work-conference (IWBBIO 2018, Granada, Spain, April 25–27): proceedings*. Granada, Spain, 2018, part I.
8. Kramm M. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 3 (33), pp. 61–68. [In Russian]

9. Titomir L. I., Кнеппо P. *Matematicheskoe modelirovanie bioelektricheskogo generatora serdtsa* [Mathematical modeling of a bioelectric heart generator]. Moscow: Nauka; Fizmatlit, 1999, 447 p. [In Russian]
10. Baskakov S. I. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* [Electrodynamics and radio wave propagation]. Moscow: LIBROKOM, 2012, 416 p. [In Russian]
11. Brebbiya K., Telles Zh., Vroubel L. *Metody granichnykh elementov* [Boundary element methods]. Moscow: Mir, 1987, 524 p. [In Russian]
12. Lantsosh K. *Prakticheskie metody prikladnogo analiza* [Practical methods of applied analysis]. Moscow: GIFML, 1961, 524 p. [In Russian]
13. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving incorrect problems]. Moscow: Nauka, 1979, 285 p. [In Russian]
14. Kramm M. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 3 (25), pp. 86–92. [In Russian]

Крамм Михаил Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра основ радиотехники,
Национальный исследовательский университет
«МЭИ»
(Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14)
E-mail: KrammMN@mail.ru

Kramm Mikhail Nikolayevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio engineering fundamentals,
National Research University «MPEI»
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Крамм, М. Н. Эквивалентный электрический генератор сердца для неинвазивной электрокардио-
диагностики / М. Н. Крамм // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). –
С. 65–71. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-8.